Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00128

Received date : 9 April, 2021

Accepted date : 16 September, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 30 September, 2021

H 型インフラ検査用クライマーの開発とその最適同期化制御

高橋 亮^{*1}, 後藤 敬雄^{*2}, 野中 祐太郎^{*2}, 江上 正^{*3}

Development of an H-type climber for infrastructure inspection and an optimal synchronous control system

Ryo TAKAHASHI^{*1}, Takao GOTO^{*2}, Yutaro NONAKA^{*2} and Tadashi EGAMI^{*3}

^{*1,*2,*3} Department of Mechanical Engineering, Kanagawa University
3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama 221-8686, Japan

Abstract

We developed a new H-type climber for infrastructure inspection by applying the manufacturing technology for climbers used in space elevator experiments, which have been researched for many years. This inspection climber ascends and descends two belt tethers stretched in parallel, thereby reducing the degrees of freedom around each belt and making the climber more resistant to external disturbances such as wind and to twisting than when ascending and descending a single belt. The climber could move not only vertically but also horizontally and on inclines such as slopes. In addition, multiple climbers could be connected to each other by an aluminum frame, which has the advantage that various inspection units can be installed for versatile inspection. In this development work, we first conducted an experiment to investigate a drive system suitable for transporting heavy objects, and then developed the new climber for infrastructure inspection based on the results obtained. In addition, an optimal synchronous control system for position and velocity was developed as an alternative to the conventional optimal synchronous control system for position alone in order to keep the tilt of the inspection climber horizontal and to control its speed. The climber and control system were verified through simulations as well as actual experiments.

Keywords : Synchronous control, Disturbance observer, Infrastructure inspection, Climber

1. 緒 言

今日までに、1964 年の東京オリンピックの頃に整備された首都高速 1 号線をはじめ、高度成長期以降に整備したインフラが急速に老朽化し、今後 20 年間で、建設後 50 年以上経過する施設の割合が高くなる見込みである。しかし、老朽化するインフラ施設の増加に対し、十分な予算や人員を充てて点検や修繕などを行うことは困難である。

このような問題に対し、インフラ検査ロボットとして一般的に“ドローン”と呼ばれる飛行式のロボット(市川他, 2019)や吸盤や磁力を用いて直接壁面に接触して点検作業を行う壁面移動ロボット(大道他, 1996)などが研究されている。ドローンは軽量かつ少人数での作業が行えるが、操作する作業員の操作技術、バッテリーの容量に依存し、加えて風などの環境による影響を受けるため、風の強い場所では検査を実行できない可能性が生じる。また、壁面移動ロボットでは、直接壁面を検査するので高精度な打音検査やクラックの判定が可能だが、壁面の状態に依存するため、壁面の状態によっては移動が困難な場合が生じ、十分な吸着力を確保しようとする壁面に傷をつけてしまう場合がある(藤沢他, 2017)。

本研究では、著者らがこれまで取り組んできた宇宙エレベーターを想定した自走式昇降機の技術を応用し(江上他, 2017)、新規インフラ検査システムの開発を行い、実験により検証を行う。

No.21-00128 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00128]

^{*1} 学生員, 神奈川大学 工学部 (〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)

^{*2} 神奈川大学 工学部

^{*3} 正員, 神奈川大学 工学部

E-mail of corresponding author: egami@kanagawa-u.ac.jp

宇宙エレベーターとは、既存の宇宙への輸送手段であるロケットに代わるものとして新しく構想されている輸送手段である。宇宙エレベーターは、ロケットに比べ安定して物資や人を運搬することが可能である。宇宙エレベーターの構造は、テザーと呼ばれるケーブルを静止衛星から地表へと重力と遠心力が釣り合うようにつなぎ、これを伝って地球から宇宙へと昇降するものである。テザーを用いた昇降はクライマーと呼ばれる自走式昇降機が行い、このクライマーが物資や人の運搬を行う。現状の技術で宇宙エレベーターのテザーを作ることが難しい点や、初期の建設における費用及び場所の問題、テロ問題やスペースデブリ問題など実現に向けて様々な問題がある。そのような問題の1つに、テザーを昇降するクライマー技術の問題があり、大林組の構想によれば質量が約100tのクライマーが長距離を安定して昇降を行う必要があるとされる(大林組プロジェクトチーム, 2013)。

著者らは、これまでに様々な実験用クライマーの研究、開発を行い、検証を行ってきた。本論文では、そこで得られた技術を応用し、新規インフラ検査システムの開発を行う。今回提案する検査方法は、検査平面に対し平行に2本のベルトを設置し、機械的に結合された2機のクライマーの間に様々な検査や補修用のユニットを搭載し、検査や補修等を行うものである。図1に提案するクライマーを用いたときのビル壁面および鉄塔検査時の構想を示す。本研究では、最初にこの目的に適した駆動ユニットの開発を行い、重量物搬送に適した機構を搬送力比較実験により検証する。そして、その駆動ユニットを用いて開発するインフラ検査用クライマーは、2機のクライマーが常に同じ位置で移動し、平行に近い状態を保つ必要がある。そこで、本研究では位置および速度の同期化を可能とする最適位置速度同期化制御系を新たに提案し、これを用いて制御系の比較実験を行い、その有効性を検証する。

類似の壁面検査方法としてウインチやワイヤ、ベルトを使用して、マンションなどの建造物の検査を行うシステムなどが研究されている(土井, 井上, 2012)(土井, 沼崎, 2019)。しかし、一回の点検で設置、調整に長時間を要し、効率の良いシステムではなく、窓などの開口部やベランダなどの突出部のある外壁では適用が難しいとされる。加えて、単純に検査物が吊り下げられた状態なので風やねじれなどの外乱に弱く、垂直に吊り下げられない場所では不向きである。それに対して本研究では両端で張力のかかった2本のテザーにクライマーを結合し、昇降させるというシステムを提案する。定期的に検査する場所で、あらかじめ検査場の準備をする必要があるが、一度用意してしまえば設置、調整時間を短時間で済ませることができ、ベルト両端を固定し張力をかけるので傾斜のある崖や鉄塔、橋などの調査や重量物搬送も行うことが可能になる。また、1機体単体で昇降させるよりもベルト軸回りの動きに制限が加わり、ベルト周りに対して風などによるねじれを抑えることができる。さらに結合部分の広い空間を利用して汎用性のある様々なインフラ検査機を搭載し、検査を行うことができる利点がある。

Fig. 1 Concept of building wall surface and steel tower inspection using the proposed climber.

2. 駆動ユニットの開発

本研究で使用するインフラ検査クライマー(以下H型クライマーとする)は2機のクローラ駆動型のユニットをアルミフレームを用いて機械的に結合したものである。使用したクローラ駆動型ユニット上面と下面を図2に示し、H型クライマーの全体図を図3に示す。

クローラ駆動ユニットは、駆動部にタイミングベルトを用いたユニットである。著者らは、主にクローラ駆動とウレタンローラを駆動部に用いたローラ駆動の機体を長年製作してきたが、重量物搬送時にはクローラ駆動のユニットのほうが優れていることを明らかにしている(後藤他, 2020)。しかし、このときの検証実験ではモータへの入力を一定値加算して検証を行っていたため、重量物搬送実験時に速度が統一した条件での検証が行えていなかった。本研究では、速度、押し付け力などの条件を統一し、搬送力比較実験を行った。この検証実験では、最適速度制御系を用いた速度制御を行い、速度をおもりの重量に依らず一定の値にした。検証実験で使用するおもりは2Lのペットボトルを使用し、押し付け圧を一定にするため、最大負荷時である6kgでまず実験を行い、その際の押し付け圧を変更せずに2Lペットボトルを3本、2本と減らして検証を行った。この実験により、図4(d)に示すようにローラ駆動はおもりを増加させたときの滑りの増加が大きいが、(a)~(c)に示すようにクローラ駆動は滑りの変化が少なく、重量物搬送にはクローラ駆動が適していることがより厳密な条件下で確認された。その中でも(a)の受動部をクローラ上端に配置した場合と(b)の上端と下端に配置した場合が、(c)の中央部に配置した場合などとも比べても特に滑りが少なかった。そのため開発するH型クライマーでは滑りが少なく、最小部品構成のクローラ上端に受動部を配置し、制御系の検証実験を行う。

Fig. 2 Overall of the crawler drive unit using a timing belt for the drive unit. This unit has a size of 300×170×120mm.

Fig. 3 Overall of H-type climber for infrastructure inspection. This climber has a size of 640×2280×260mm. This climber mechanically connects the two crawler drive units shown in Fig. 2 using an aluminum frame.

Fig. 4 Results of weight transport force comparison experiment. In this experiment, various weights are transported using three crawler drive units and a roller drive unit with different passive roller arrangements.

3. 最適位置速度同期化制御系の構成

本研究で開発した H 型クライマーは、2 機のユニット間で同期を行い位置差なく水平に近い状態での昇降、かつ目標位置に追従するような制御が必要である。従来、位置同期を行う際に、位置制御系に相対位置誤差を用いて同期化をさせる最適位置同期化制御系を用いてきた(江上, 依田, 1998) (江上他, 2017) (Sarieva et al., 2019) (永田他, 2020)。しかしこれは、位置差を低減することができるが、速度に関しては直接制御していないため、速度が振動するなどして精度よく目標位置に追従させることができないことがあった。そこで、今回は速度と位置の両

方の誤差を抑制でき、同期化を行える最適位置速度同期化制御系を提案する。最初に外乱オブザーバを構成し(大西, 1993), 各モータ毎の最適位置速度制御系, モータ間の最適位置速度同期化制御系の順に構成する。

3・1 外乱オブザーバ

各クローラ駆動ユニットには駆動源としてモータが用いられているが, モータに接続されるローラやクローラ, 筐体部分をモータに対する負荷と見なして, モータの運動方程式を以下のように表す。

$$J\dot{\omega} + D\omega = K(i)i + T_L + d_L \quad (1)$$

J , D , K はそれぞれ慣性モーメント, 粘性係数, 推力定数を表すモータのパラメータである。 ω は回転角速度, i は電流指令値を表し, 駆動ユニットのモータに対する負荷トルクを T_L , 外乱やセンサーノイズ等を d_L とする。

ここで, 添え字の n はノミナル値を表すものとして, 式(1)をノミナル値を用いて表すと以下のようになる。

$$\begin{aligned} J_n\dot{\omega} + D_n\omega &= K_n i_R + (J_n - J)\dot{\omega} + (D_n - D)\omega + \{K(i)i - K_n i_R\} + T_L + d_L \\ &= K_n i_R + d \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)で d は負荷トルク T_L , パラメータ誤差 $(J_n - J)\dot{\omega} + (D_n - D)\omega + \{K(i)i - K_n i_R\}$, 外乱, センサーノイズ等 d_L などからなる等価外乱項とする。等価外乱 d を図5に示すように外乱オブザーバを用いて推定し, その推定値を $\hat{d}$ とすると $\hat{d} = d$ とみなせるとき, 式(1)は

$$J_n\dot{\omega} + D_n\omega = K_n i_R \quad (3)$$

と表すことができる。ただし, 図5で α は1次ローパスフィルタの極とする。ここで, モータへの入力 i_R を u_j , 回転角度を θ_j とし, 式(3)をまとめると

$$\dot{x}_j = A_{cj}x_j + b_{cj}u_j \quad (4)$$

ここで

$$x_j = \begin{bmatrix} \theta_j \\ \omega_j \end{bmatrix} \quad A_{cj} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{D_{nj}}{J_{nj}} \end{bmatrix} \quad b_{cj} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{nj}}{J_{nj}} \end{bmatrix}$$

となる。ただし, $j = 1, 2$ とする。そして, 式(4)をサンプリング周期を T として離散化すると

$$x_j(k+1) = A_j x_j(k) + b_j u_j(k) \quad (5)$$

ここで

$$A_j = e^{A_{cj}T} = \begin{bmatrix} 1 & a_{j1} \\ 0 & a_{j2} \end{bmatrix} \quad b_j = \int_0^T e^{A_{cj}\tau} d\tau \cdot b_{cj} = \begin{bmatrix} b_{j1} \\ b_{j2} \end{bmatrix}$$

となる。

次に制御入力 $u_j(k)$ を

$$u_j(k) = u_{fj}(k) + u_{sj}(k) \quad (6)$$

と各モータの最適位置速度入力 u_{fj} とモータ間の最適位置速度同期入力 u_{sj} に分けて考える。

3・2 最適位置速度制御系

3.2以下では式(4)で与えられる外乱オブザーバにより補償されたモータを制御対象として, それを離散化した式(5)に基づいて制御系設計を行う。最初に $u_{sj}(k) = 0$ として各モータの最適位置速度制御入力 $u_{fj}(k)$ を求める。モータの目標角速度を $\omega_r(k)$, 角速度を $\omega_j(k)$, 角速度誤差を $e_{\omega j}(k)$, 目標角度を $\theta_r(k)$, 角度を $\theta_j(k)$, 角度誤差を $e_{\theta j}(k)$ として,

$$e_{\omega j}(k) = \omega_r(k) - \omega_j(k) \quad (7)$$

$$e_{\theta j}(k) = \theta_r(k) - \theta_j(k) \quad (8)$$

と相対角速度誤差および相対角度誤差を定義する。ここで, 位置誤差の微分が速度誤差になることを用いて

$$e_{\theta j}(k+1) = e_{\theta j}(k) + \frac{T}{2} \{e_{\omega j}(k+1) + e_{\omega j}(k)\} \quad (9)$$

と近似を行い、誤差と制御対象の状態変数の一階差分値を新たな状態変数とする次のエラーシステムを構成する。ここで Δ は一階差分値を表し、入力むだ時間は考慮していない。

$$\mathbf{X}_{fj}(k+1) = \Phi_{fj}\mathbf{X}_{fj}(k) + \gamma_{fj}\Delta u_{fj}(k) + \gamma_{fr}\Delta\omega_r(k+1) \quad (10)$$

ここで、

$$\mathbf{X}_{fj}(k) = \begin{bmatrix} e_{\theta j}(k) \\ e_{\omega j}(k) \\ \Delta\omega_j(k) \end{bmatrix} \quad \Phi_{fj} = \begin{bmatrix} 1 & T & -\alpha_{j2}T/2 \\ 0 & 1 & -\alpha_{j2} \\ 0 & 0 & \alpha_{j2} \end{bmatrix} \quad \gamma_{fj} = \begin{bmatrix} -\beta_{j2}T/2 \\ -\beta_{j2} \\ \beta_{j2} \end{bmatrix} \quad \gamma_{fr} = \begin{bmatrix} T/2 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

である。

式(10)に対して、評価関数を以下のように定義する。

$$J_f = \sum_{k=1}^{\infty} [\mathbf{X}_{fj}^T(k) \mathbf{Q}_{fj} \mathbf{X}_{fj}(k) + h_{fj} \Delta u_{fj}^2(k)] \quad (11)$$

ここで、

$$\mathbf{Q}_{fj} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & q_{j1} & 0 \\ 0 & 0 & q_{j2} \end{bmatrix}$$

である。

式(11)の評価関数を最小とするような最適位置速度制御入力 $u_{fj}(k)$ は以下のように求められる。

$$\Delta u_{fj}(k) = \mathbf{F}_{fj} \mathbf{X}_{fj}(k) \quad (12)$$

ここで

$$\mathbf{f}_{fj} = [f_{fj1} \quad f_{fj2} \quad f_{fj3}] = -[h_{fj} + \gamma_{fj}^T \mathbf{P}_{fj} \gamma_{fj}]^{-1} \gamma_{fj}^T \mathbf{P}_{fj} \Phi_{fj}$$

$$\mathbf{P}_{fj} = \mathbf{Q}_{fj} + \Phi_{fj}^T \mathbf{P}_{fj} \Phi_{fj} - \Phi_{fj}^T \mathbf{P}_{fj} \gamma_{fj} [h_{fj} + \gamma_{fj}^T \mathbf{P}_{fj} \gamma_{fj}]^{-1} \gamma_{fj}^T \mathbf{P}_{fj} \Phi_{fj}$$

である。

そして、式(12)を初期値を零として変形すると

$$u_{fj}(k) = f_{fj1} \sum_{k=1}^k e_{\theta j}(k) + f_{fj2} \sum_{k=1}^k e_{\omega j}(k) + f_{fj3} \omega_j(k) \quad (13)$$

となる。

3・3 最適位置速度同期化制御系

次に、 $u_{fj}(k)$ を用いた2機のクローラ駆動ユニット内のモータの閉ループ制御系に対して、これらのモータ間の最適位置同期入力 $u_{sj}(k)$ を求める。式(12)の制御入力を用いた各モータの閉ループ制御系をまとめて表すと以下になる。なお、この二つのシステムは非干渉となる。

$$\mathbf{X}_s(k+1) = \Phi_s \mathbf{X}_s(k) + \Gamma \Delta \mathbf{u}_s(k) + \Gamma_r \Delta \omega_r(k+1) \quad (14)$$

ここで、

$$\mathbf{X}_s(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{f1}(k) \\ \mathbf{X}_{f2}(k) \end{bmatrix} \quad \Phi_s = \begin{bmatrix} \Phi_{f1} + \gamma_{f1} \mathbf{f}_{f1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Phi_{f2} + \gamma_{f2} \mathbf{f}_{f2} \end{bmatrix} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{f1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \gamma_{f2} \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{u}_s(k) = \begin{bmatrix} \Delta u_{s1}(k) \\ \Delta u_{s2}(k) \end{bmatrix} \quad \Gamma_r = \begin{bmatrix} \gamma_{fr} \\ \gamma_{fr} \end{bmatrix}$$

である。

いま、モータ1, 2の相対角度誤差を $e_{\theta 12}(k)$ 、相対角速度誤差を $e_{\omega 12}(k)$ とすると

$$e_{\theta 12}(k) = \theta_1(k) - \theta_2(k) = e_{\theta 2}(k) - e_{\theta 1}(k) \quad (15)$$

$$e_{\omega 12}(k) = \omega_1(k) - \omega_2(k) = e_{\omega 2}(k) - e_{\omega 1}(k) \quad (16)$$

となり、式(15), (16)を用いて最適位置速度同期化制御系の評価関数を以下のように定義する.

$$\begin{aligned}
 J_s &= \sum_{k=1}^{\infty} [e_{\theta 1}^2(k) + e_{\theta 2}^2(k) + \gamma_1 e_{\omega 1}^2(k) + \gamma_2 e_{\omega 2}^2(k) + \gamma_{\theta s} e_{\theta 12}^2(k) + \gamma_{\omega s} e_{\omega 12}^2(k) \\
 &\quad + h_{s1} \Delta u_{s1}^2 + h_{s2} \Delta u_{s2}^2(k)] \\
 &= \sum_{k=1}^{\infty} [\mathbf{X}_s^T(k) \mathbf{Q}_s \mathbf{X}_s(k) + \Delta \mathbf{u}_s^T(k) \mathbf{H}_s \Delta \mathbf{u}_s(k)]
 \end{aligned} \tag{17}$$

ここで,

$$\mathbf{Q}_s = \begin{bmatrix} 1 + \gamma_{\theta s} & 0 & 0 & -\gamma_{\theta s} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_1 + \gamma_{\omega s} & 0 & 0 & -\gamma_{\omega s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma_{\theta s} & 0 & 0 & 1 + \gamma_{\theta s} & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma_{\omega s} & 0 & 0 & \gamma_2 + \gamma_{\omega s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H}_s = \begin{bmatrix} h_{s1} & 0 \\ 0 & h_{s2} \end{bmatrix}$$

である.

本制御系は、式(10), (14)ではそれぞれのモータについての記述なので干渉項はなく、式(17)の評価関数で相対角度誤差、相対角速度誤差という干渉項を与えて同期化制御を行っているのが本提案手法の特徴である.

式(17)の評価関数を最小とするような最適位置同期入力 $u_{sj}(k)$ は以下のように求められる.

$$\Delta \mathbf{u}_s(k) = \mathbf{F}_s \mathbf{X}_s(k) \tag{18}$$

ここで,

$$\mathbf{F}_s = \begin{bmatrix} f_{s11} & f_{s12} & f_{s13} & f_{s14} & f_{s15} & f_{s16} \\ f_{s21} & f_{s22} & f_{s23} & f_{s24} & f_{s25} & f_{s26} \end{bmatrix} = -[\mathbf{H}_s + \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{P}_s \mathbf{\Gamma}]^{-1} \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{P}_s \mathbf{\Phi}_s$$

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{Q}_s + \mathbf{\Phi}_s^T \mathbf{P}_s \mathbf{\Phi}_s - \mathbf{\Phi}_s^T \mathbf{P}_s \mathbf{\Gamma} [\mathbf{H}_s + \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{P}_s \mathbf{\Gamma}]^{-1} \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{P}_s \mathbf{\Phi}_s$$

である.

式(18)を初期値を零として変形すると

$$\begin{aligned}
 u_{sj}(k) &= f_{sj1} \sum_{k=1}^k e_{\theta 1}(k) + f_{sj2} \sum_{k=1}^k e_{\omega 1}(k) + f_{sj3} \omega_1(k) + f_{sj4} \sum_{k=1}^k e_{\theta 2}(k) + f_{sj5} \sum_{k=1}^k e_{\omega 2}(k) \\
 &\quad + f_{sj6} \omega_2(k)
 \end{aligned} \tag{19}$$

となる.

したがって制御入力は、式(12)と式(18)を併せたものとなる. ここで、最初から最適位置速度同期化制御系だけを構成してもよいが、今回のように各モータの最適位置速度制御系を構成した上で、最適位置速度同期化制御系を構成したほうが、段階的に制御系を構成でき、実験などに都合がよいと考えられる. 構成した最適位置速度同期化制御系のブロック線図を図6に示す. 図6でのMotor control system1, 2は式(12), (13)で示したモータ1, 2の最適位置速度制御系を表し、2機のMotor control systemに対して最適位置速度同期化制御系を構成している.

Fig. 5 Block diagram of the disturbance observer that estimates the equivalent disturbance d .

Fig. 6 In the motor control systems 1 and 2, the disturbance observers shown in Fig. 5 are configured for the crawler drive units, and the optimal control systems for position and velocity are configured. The optimal synchronous control system for position and velocity is configured for these control systems.

4. ジンバルユニットの搭載

提案する外乱オブザーバ及び最適位置速度同期化制御系の有効性を検証するために、新たに開発したジンバルユニットを搭載して負荷重量に対する応答の変化、およびユニットに搭載されている水平移動機構を動作させて、昇降中の重心位置を変化させたときの応答の変化の検証実験を行った。ジンバルユニットは今回開発した H 型クライマーとの協調動作を可能とするために新たに開発しており、重量はバッテリーを含めて 1.67kg である。(野中他, 2021)。ジンバルユニット全体図を図 7 に示す。使用するジンバルユニットは大きくジンバルと水平移動機構に分けることができ、水平移動機構は図 3 上の検査物取り付け空間のアルミフレームに取り付ける。この水平移動機構により、水平移動機構の移動距離分ではあるが、ジンバルに取り付けられたカメラの範囲外撮影も可能になる。ジンバル部はサーボモータによる姿勢制御を行い、カメラ位置を常に目標位置に維持する制御を行っている。

Fig. 7 Gimbal unit overall. This gimbal unit has a size of 131×174×239.8mm and 1.24kg. Camera is installed on gimbal to inspect the wall surface.

5. シミュレーションおよび卓上実験による検討

屋外での実験を行う前に、シミュレーションおよび卓上実験で今回用いる最適位置速度同期化制御系の検証を行った。シミュレーションでは実際の屋外昇降実験と同じ条件とし、20m 上昇させ、20m 到達時に停止させた。今回用いる各パラメータは、モータの推力定数： $J_n = 15\text{Nm/A}$ 、粘性係数： $D_n = 3.0\text{Nms/rad}$ 、慣性モーメント： $K_n = 2.0\text{kgm}^2$ とし、サンプリング周期は10msとしている。最適位置速度同期化制御系の重みは $q_{j1} = 1.0$ 、 $q_{j2} = 5.0 \times 10^6$ 、 $h_{fj} = 1.0$ 、 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1.0 \times 10^3$ 、 $\gamma_{\theta s} = 0$ 、 $\gamma_{\omega s} = 1.0 \times 10^4$ 、 $h_{s1} = h_{s2} = 5.0 \times 10^4$ とし、外乱オブザーバの1次ローパスフィルタの極は $\alpha = 45$ としており、最適位置同期化制御系(Sariev et al., 2019)の重みは相対位置誤差の重みを γ_s として、 $q_{j1} = q_{j2} = 4.0 \times 10^3$ 、 $h_{fj} = 10$ 、 $\gamma_s = 10$ 、 $h_{s1} = h_{s2} = 2.0 \times 10^2$ とし、 $\alpha = 40$ としている。

最初に、従来の最適位置同期化制御系と今回提案する最適位置速度同期化制御系での位置応答、速度応答のシミュレーションおよび卓上実験結果を図8に示す。(a)の最適位置同期化制御系では、位置応答についてはシミュレーションと卓上実験での差はみられなかった。しかし、速度応答では卓上実験の方がシミュレーションよりも大きな減衰振動を生じてしまった。これに対して、(b)の最適位置速度同期化制御系では位置、速度のどちらも概ねシミュレーションと一致しており、速度追従性や位置追従性が最適位置同期化制御系より優れていることがわかる。これにより、最適位置速度同期化制御系を用いることで位置と速度両方を目標値に対して追従可能であることが確かめられた。

次に、最適位置速度同期化制御について相対位置誤差の重み $\gamma_{\theta s}$ 、相対速度誤差の重み $\gamma_{\omega s}$ を変化させたときの累積相対位置誤差の面から、最適位置速度同期化制御系の有効性の検証についてシミュレーション結果を図9に示す。相対位置誤差、相対速度誤差は絶対値で表している。同期化の重みは、それぞれ $\gamma_{\theta s} = 0$ 、 $\gamma_{\omega s} = 1.0 \times 10^4$ および $\gamma_{\theta s} = 1.0 \times 10^4$ 、 $\gamma_{\omega s} = 0$ 、さらに $\gamma_{\theta s} = 1.0 \times 10^4$ 、 $\gamma_{\omega s} = 1.0 \times 10^4$ として、それ以外の重みは図8のシミュレーションと同値とした。また、図8に使用した条件でのパラメータに対して、片方のモータのパラメータをモータの推力定数： $J_n = 10\text{Nm/A}$ 、粘性係数： $D_n = 1.0\text{Nms/rad}$ 、慣性モーメント： $K_n = 1.0\text{kgm}^2$ と変化させている。(a)の相対位置誤差において、 $\gamma_{\theta s} = 0$ では、モータの特性が異なるため速度差を収束するのに時間を要し、位置差が大きくなっているが、時間とともに収束している。また、 $\gamma_{\omega s} = 0$ では始動時で位置差が増加している

が, $\gamma_{\theta s} \neq 0$, $\gamma_{\omega s} \neq 0$ では始動時の位置差を小さくできていることがわかる. また, $\gamma_{\omega s} = 0$ よりも $\gamma_{\theta s} \neq 0$, $\gamma_{\omega s} \neq 0$ の方が位置差の収束が早く, (b)の累積相対位置誤差も低減できていることがわかる.

Fig. 8 Comparison results between simulation and tabletop experiments. The control systems used are the conventional optimal synchronous control system for position alone and the proposed optimal synchronous control system for position and velocity.

Fig. 9 Simulation results when the control parameters of the optimal synchronous control system for position and velocity are changed.

6. 屋外実験による検討

検証実験では, 図 10 に示す神奈川大学 23 号館の壁面昇降設備で実験を行った. この設備は最大上昇距離 25m である. 位置目標値を 20m として 1 秒間で 1m 進むような台形状目標値とし, 速度目標値は位置目標値を微分した値を与えた. 制御周期は 10ms とし, 図 8 の卓上実験と同じパラメータや重みを用いている. 初めに位置同期の重み $\gamma_{\theta s} = 0$ として実験を行い, その後位置同期の重み $\gamma_{\theta s} \neq 0$ とした場合の実験結果と比較した.

ジンバルユニットを搭載して水平移動機構を動作させ, 上昇時に重心位置を変化させる条件での実験を行った. 実験結果を図 11 に示す. 水平移動機構は, 検査ユニットの水平移動機構によりアルミフレーム上で 300mm の往復移動を 60mm/s の平均速度で行っている. (a)の最適位置同期化制御系では速度に対して直接制御を行えないため, 減衰振動している. これに対し, (b)の最適位置速度同期化制御系では, 速度目標値に対して制御が行えており, 位置応答も向上していることがわかる. どちらの実験でも水平移動により重心位置が変化した場合も図 7 の卓

Fig. 10 Outdoor climbing equipment in Kanagawa University Building No. 23. This equipment has a maximum climb distance of 25m.

上実験とほぼ同じ応答を示していることがわかる。このことから、外乱オブザーバにより昇降時のパラメータ誤差を補償できているといえる。相対位置誤差の面では(a)の最適位置同期化制御系では、減衰振動しているが(b)の最適位置速度同期化制御系の方は振動が生じておらず、(c)の累積相対位置誤差も半分程度になっていることがわかる。また、(a)、(b)の上昇停止時の位置差は、最適位置同期化制御や最適位置速度同期化制御とは関係なく、目標位置 20m 到達時にこれらの制御系を停止し、ブレーキをかけた後の滑りなどによって決まるものである。ブレーキをかけた後の滑りなどは制御していないため、多少のずれは生じ、図 11 では(a)より(b)の方が少し大きくなっている。位置差のばらつきはおおよそ 0.5~2.0mm の範囲、機体の傾き 1deg 以内に収まっていることを確認している。

Relative position difference

(a) Optimal synchronous control system for position alone

(b) Optimal synchronous control system for position and velocity

(c) Cumulative position error in the optimal synchronous control systems for position alone and for position and velocity

Fig. 11 Experimental results when the gimbal unit is installed. Responses of the optimal synchronous control system for position alone and the optimal synchronous control system for position and velocity during horizontal movement mechanism operation.

次に、最適位置速度同期化制御系で $\gamma_{\theta s} \neq 0$ とした実験結果を図 12 に示す。実験では図 11 から相対位置誤差の重みのみ $\gamma_{\theta s} = 1.0 \times 10^4$ とした。実験結果より、(a)位置、(b)速度応答、(c)累積相対位置誤差に関しては、 $\gamma_{\theta s} = 0$ のときの応答とほとんど変化が見られなかった。しかし、(d)累積相対速度誤差では $\gamma_{\theta s} \neq 0$ の方がわずかに低減できていることがわかる。

(a) Position response

(b) Velocity response

(c) Cumulative position difference

(d) Cumulative velocity difference

Fig. 12 Responses of the optimal synchronous control system for position and velocity with and without position synchronous.

7. 結 言

今回、宇宙エレベーター実験用クライマー製作技術を応用してインフラ検査システムを開発するために、最初に駆動方式についてより厳密な条件下で搬送力比較実験を行った。その結果、厳密な条件下でも従来研究同様クローラ駆動のほうがローラ駆動よりも滑りが少ない傾向になり、重量搬送に適していることが実験により示せた。またクローラ駆動の中でも、中央部で従動輪を押し付けるより、上端での押し付けや上端と下端で押し付ける方がより滑りが少ない結果となった。この結果をもとにH型クライマーの駆動部を開発した。

開発されたH型クライマーを用いて制御系の比較実験を行った。従来手法の最適位置同期化制御系を用いることにより2機のクローラ駆動ユニットを同期して、水平を保った状態で昇降を行うことが可能であるが、速度に対して直接制御ができず、このことから位置応答を向上できないという欠点があった。これに対し本研究では位置・速度を同時に制御できる最適位置速度同期化制御系の提案を行った。これらの制御系に対しまずシミュレーションおよび卓上実験を行い制御系の比較を行った。これにより位置、速度を両方同期制御した位置速度同期化制御系では位置差を他と比べ小さくでき、速度も制御できるという結果が得られた。

次に、この制御系を用いた屋外実験の結果では、ジンバルの水平移動により重心が上昇中に変化する状況下でも、外乱オブザーバにより卓上実験時とほぼ同じ応答を示し、より安定した昇降が可能であることを検証した。この検証により、従来手法の最適位置同期化制御系より、今回提案する最適位置速度同期化制御系の方が速度の振動が生じず、位置差の低減が可能であることを確認できた。また、相対位置誤差の重みの効果についてもわずかなではあるが効果があることを検証している。

文 献

- 土井暁, 井上文宏, 超高層集合住宅外壁検査システム「スカイクライマー」, 大林組技術研究所報, No. 76(2012), pp. 1-7.
- 土井暁, 沼崎孝義, 外壁検査システム「ウォールチェッカー」の開発, 大林組技術研究所報, No. 83(2019), pp. 1-6.
- 江上正, 依田一宏, メカトロサーボ系の最適同期化経路制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 34, No. 9(1998), pp. 1178-1183.
- 江上正, 長島祥, 梅本和希, CMG ユニットを用いたロープ型宇宙エレベーター実験用クライマーの昇降安定化制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 35, No. 1(2017), pp. 47-54.
- 藤沢隆介, 梅本和希, 田中基康, 佐藤徳孝, 永谷直久, 勝山真規, ワイヤ移動式橋梁点検ロボットシステム ARANEUS の開発と運用, 土木学会論文集, Vol. 73, No. 1(2017), pp. 26-37.
- 後藤敬雄, 高橋亮, 江上正, インフラ検査用昇降機の開発, 第 52 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, A01(2020), pp. 1-4.
- 市川明彦, 阿部雄樹, 池田貴公, 大原賢一, 岸川純平, 芦澤怜史, 大道武生, 沖野晃久, 福田敏男, マニピュレータを搭載した橋梁点検用 UAV, 日本ロボット学会誌, Vol. 37, No. 7(2019), pp. 613-619.
- 永田雄基, 菅原慧, 江上正, 最近点探索と進行方向の目標点設定を用いた経路制御手法のボール&プレート装置への適用, 日本機械学会論文集, Vol. 86, No. 882(2020), DOI:10.1299/transjsme.19-00286.
- 野中祐太郎, 中村俊貴, 江上正, 3次元ジンバル雲台を用いた架空送電工事支援ロボットの開発, 第53回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, A03(2021), pp. 7-8.
- 大林組プロジェクトチーム, 地球と宇宙をつなぐ 10 万 km タワー「宇宙エレベータ」建設構想, 季刊大林, No. 53(2013), pp. 30-59.
- 大道武生, 井辺智吉, 樋口優, 長屋充, 竹内清一, 磁性体構造上の高速移動装置の開発, 三菱重工技報, Vol. 33, No. 6(1996), pp. 444-447.
- 大西公平, 外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4(1993), pp. 486-493.
- Sarieva, M., Yao, L., Sugawara, K. and Egami, T., Synchronous position control of robotics system for infrastructure inspection moving on rope tether, Journal of Robotics and Mechanics, Vol. 31, No. 2(2019), pp. 317-328.

References

- Doi, S. and Inoue, F., Self-climbing outer wall inspection system for high-rise apartments, Obayashi Corporation Technical Research Institute Report, No. 76(2012), pp. 1-7(in Japanese).
- Doi, S. and Numazaki T., Development of high-efficiency outer wall inspection system, Obayashi Corporation Technical Research Institute Report, No. 83(2019), pp. 1-6(in Japanese).
- Egami, T. and Yoda, K., Optimal synchronous path control of mechatronic servo system, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 34, No. 9(1998), pp. 1178-1183(in Japanese).
- Egami, T., Nagashima, A. and Umemoto, K., Lift stabilization control for an experimental space elevator climber for a rope-type tether using a CMG unit, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 35, No. 1(2017), pp. 47-54(in Japanese).
- Fujisawa, R., Umemoto, K., Tanaka, M., Sato, N., Nagaya, N. and Katsuyama, M., Development and operation of wire mobile bridge inspection robot system ARANEUSARANEUS, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 73, No. 1(2017), pp. 26-37(in Japanese).
- Goto, T., Takahashi, R. and Egami, Tadashi., Development of elevators for infrastructure inspection, The 52rd Annual Meeting of the Society of Instrument and Control Engineers Hokkaido Branch, A01(2020), pp. 1-4(in Japanese).
- Ichikawa, A., Abe, Y., Ikeda, T., Ohara, K., Kishikawa, J., Ashizawa, S., Oomichi, T., Okino, T. and Fukuda, T., UAV with manipulator for bridge inspection, Journal of the Robotics, Vol. 37, No. 7(2019), pp. 613-619(in Japanese).
- Nagata, Y., Sugawara, K. and Egami, T., Application of a path control method using nearest-point search and target-point setting in the direction of moving for a ball-and-plate device, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 86, No. 882(2020), DOI:10.1299/transjsme.19-00286.
- Nonaka, Y., Nakamura, T. and Egami, T., Development of a construction support robot that moving up and down overhead transmission towers with 3-axis gimbal, The 53rd Annual Meeting of the Society of Instrument and Control Engineers Hokkaido Branch, A03(2021), pp. 7-8(in Japanese).
- Obayashi Corporation Project Team., Concept of Building a 100,000km Tower "Space Elevator" to Connect Earth and Space, The Quarterly Journal of Obayashi, No. 53(2013), pp. 30-59(in Japanese).
- Oomichi, T., Ibe, T., Higuchi, Y., Nagaya, M. and Takeuchi, S., Development of high velocity mobile mechanism on steel structure, Mitsubishi Heavy Industries Technical Journal, Vol. 33, No. 6(1996), pp. 444-447(in Japanese).
- Onishi, K., Robust motion control with disturbance observer, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 11, No. 4(1993), pp.486-493(in Japanese).
- Sarieva, M., Yao, L., Sugawara, K. and Egami, T., Synchronous position control of robotics system for infrastructure inspection moving on rope tether, Journal of Robotics and Mechanics, Vol. 31, No. 2(2019), pp. 317-328.