

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	フィン状連鎖を有する水撃音響式壁面検査のための平面平行ワイヤ駆動機構 (平均張力のフィードバックによる内力制御)
Title(English)	Planar Cable-Driven Parallel Robot with Fin-Like Chains for Water Jet Impact Acoustic Wall Inspection – Internal Force Control by Average Cable Tension Feedback –
著者(和文)	菅原雄介, 熱海七都, 栃木渉, 干場功太郎, 武田行生, 柳田克己, 水谷亮, 三谷哲史, 片村立太
Authors(English)	Yusuke Sugahara, Nanato Atsumi, Wataru Tochigi, Kotaro Hoshiba, Yukio Takeda, Katsumi Yanagita, Ryo Mizutani, Satoshi Mitani, Ryuta Katamura
出典(和文)	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2022予稿集, , , 2P1-K09
Citation(English)	, , , 2P1-K09
発行日 / Pub. date	2022, 6

フィン状連鎖を有する水撃音響式壁面検査のための平面平行ワイヤ駆動機構 (平均張力のフィードバックによる内力制御)

Planar Cable-Driven Parallel Robot with Fin-Like Chains
for Water Jet Impact Acoustic Wall Inspection

– Internal Force Control by Average Cable Tension Feedback –

○正 菅原 雄介 (東工大) 学 熱海 七都 (東工大) 栃木 渉 (東工大)
干場 功太郎 (東工大) 正 武田 行生 (東工大) 柳田 克己 (鹿島建設)
正 水谷 亮 (鹿島建設) 三谷 哲史 (鹿島建設) 正 片村 立太 (鹿島建設)

○Yusuke SUGAHARA, Nanato ATSUMI, Wataru TOCHIGI, Kotaro HOSHIBA,
and Yukio TAKEDA, Tokyo Institute of Technology
Katsumi YANAGITA, Ryo MIZUTANI, Satoshi MITANI, and Ryuta KATAMURA
Kajima Corporation

For the vertical planar cable-driven parallel robot for wall inspection, this paper proposes the control system to realize the desired positioning stiffness of the end-effector by controlling the internal force while keeping the resultant force of the tensions constant by the average tension feedback. In this method, the integral feedback term of the average tension is added to the commanded cable length in the computed torque method, and it is distributed to the modification value of each cable length so as to satisfy the equilibrium equation on the end-effector. From the stiffness evaluation experiment using the prototype, the improvement effects of the stiffness and the accuracy of the stiffness about the axes on the motion plane, have been confirmed.

Key Words: Cable driven parallel robots, Construction robots, Parallel mechanism

1 緒言

鹿島建設・東京工業大学・熊本大学は共同で、森らによる水撃音響法 [1] を用いた自動建物外壁タイル検査システムを開発中である。水撃音響法は構造物に水撃を当て生じる音響の解析によりその欠陥を検知する手法であり、壁面に非接触で検査可能であり、また比較的高速で移動しながらの検査が可能である。

一方、このような検査装置の建物外壁への位置決めについては、従来技術は吊下式 [2, 3]、壁面自走式 [4]、飛行式 [5, 6]、平行ワイヤ式に大別できる。とくに平行ワイヤ式は、移動式に比べ設置に多少の手間がかかるが、落下のリスクが少ないこと、検査装置の質量制限が厳しくないこと、比較的高精度に位置決めできること、連続稼働時間に制限がないこと、高速で移動可能であること、壁面の表面性状に制限がないことなどの長所がある。

平行ワイヤ式はさらに懸垂型と完全拘束型に分けられる。前者 [7] は低コストで設置作業が容易である反面、原理的に剛性が低い壁面に接触しての運用を前提としており、ベランダ等突出部のある建物外壁への適用には課題がある。一方、後者は剛性が高いが、このうち空間機構 [8, 9] は必要なウインチとワイヤの数が多く構造が複雑で高コストである。完全拘束型の平面機構は、構造が単純で低コストであるが、特定の方向の剛性が低いという問題がある。このケースでは壁面に垂直な軸方向の並進と壁面と平行な軸まわりの回転の剛性が低く、とくにこの後者については水撃の位置決め性能に大きな影響を及ぼす。内力を大きくすれば剛性は高くなるが、実用的にはあまりにも過大な内力を与えることは好ましくない。このためウインチ 1 個につきワイヤを 2 本用いる方法 [10] が提案されているが、コスト増につながるほか 2 本のワイヤの張力管理が必要となるなど課題もある。

これらに対し著者らは前報 [11] において、完全拘束型の平面平行ワイヤ機構について、内力によらず構造的に運動面内の軸まわりの回転剛性を向上させる手法として、出力節において運動面の法線軸まわりのみに回転可能な剛体の連鎖 (フィン状連鎖)

を介してワイヤを接続する設計を提案し、これにより運動面内の軸まわりの回転剛性が向上することを解析と実験により確認した。

一方、実際の運用を想定すれば、稼働中に所望の剛性を実現する必要があるが、前報では位置制御中に所望の剛性を実現できるかについては議論していない。実際には、機構のモデル誤差やサーボ剛性、ワイヤの張力緩和等により、制御中の各ワイヤの張力やこれにより決まる出力節の剛性は所望の値にならない。

本稿では、平均張力の積分フィードバックにより張力の合力を維持しながら内力のみを制御することで所望の出力節の剛性を実現する手法を提案し、この手法が機構の剛性に及ぼす効果を小型の実験装置を用いた実験により示すことを目的とする。

2 小型実験機 TKVC81

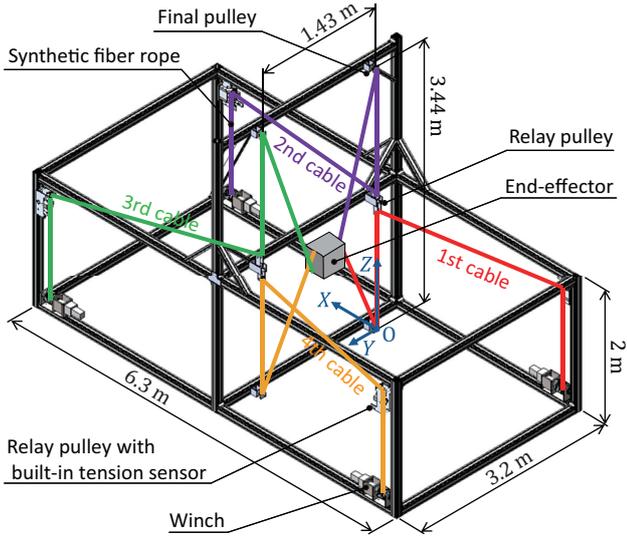
本研究で実験装置として用いる鉛直面平行ワイヤ駆動機構小型実験機 TKVC81 (Tokyo Tech Kajima Vertical CDPР No. 81) の概要を図 1 に示す。実際の壁面検査を想定し、縦 3.44 m × 横 1.43 m の縦長の作業領域を有する平面 3 自由度平行ワイヤ機構である。なお実際の運用においては数十 m 規模の作業領域となるが、この小型実験機はそのスケールモデルとなる。

フレームの床面付近の四隅にはそれぞれトルク制御モードのブレーキ付サーボモータで駆動されるウインチが設置されており、ここから繰り出されたワイヤは複数の中継用プーリを介して出力節に取り付けられる。中継用プーリには張力センサが設置されており、各ワイヤの張力を計測できる。

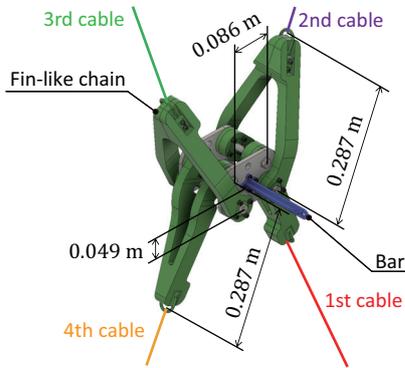
出力節は、前報で提案されたとおりフィン状連鎖を介してワイヤが接続される構造である。特に、ワイヤの作用線が 1 点で交わる不定特異点 [12] を避けるため、上下一対のフィン状連鎖を出力節の側方で交差させる設計とした。質量は 3.5 kg である。

ワイヤには合成繊維ロープであるダイニーマロープ (3 mm 径, FALCON 社製) を使用している。

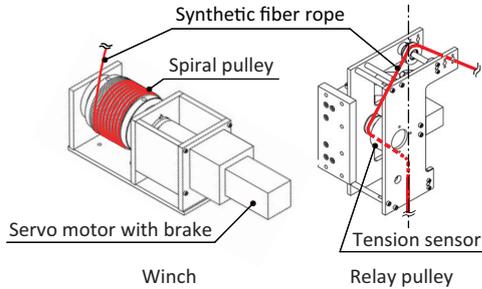
制御システムは INTime と EtherCAT を使用し、制御周期 1



(a) Overall structure



(b) End-effector with fin-like chains



(c) Winch and pulley

Fig.1 Outline of TKVC81.

ms でサーボアンプ、ロータリエンコーダ、張力センサとの通信と制御を行っている。

3 内力制御

この小型実験機には、これまで著者が過去に開発した平行ワイヤ駆動式地震動シミュレータ [13] と同様の制御系を用いていた。これはあらかじめ生成しておいた出力節の目標軌道に基づき計算トルク法を用いた位置制御を行うものである。この手法では、出力節の目標軌道から逆運動学を用いて求めたワイヤ長さの目標値を実現するよう各サーボモータが制御され、逆運動学計算における機構と動力学モデルが十分正しい場合は出力節の位置・姿勢は目標軌道に追従する。

一方その際の張力については、その目標値を与えられはするものの、機構モデルの誤差やワイヤの張力緩和により、実際は必ずしも目標値に一致しない。このため位置制御中の出力節の位置・

姿勢の剛性は所望の値にならないという問題がある。

3.1 コンセプト

この平行ワイヤ駆動機構の出力節における力のつり合い式は次のようになる [14] :

$$\mathbf{w}_P = -\mathbf{A}^T \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\mathbf{A}^T = [\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \boldsymbol{\omega}_3, \boldsymbol{\omega}_4] \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i \\ \mathbf{b}_i \times \mathbf{u}_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし、 $\mathbf{w}_P \in \mathbb{R}^3$: 出力節にかかる外力のレンチベクトル、 $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^4$: 4本のワイヤの張力ベクトル、 \mathbf{A}^T : 構造行列、 \mathbf{u}_i : i 番目のワイヤの方向を表す単位ベクトル、 \mathbf{b}_i : 出力節代表点からみた i 番目のフィン取付点の位置ベクトル。

この式から、出力節の目標位置・姿勢とこの時にかかる外力が与えられたとき、これとつり合うワイヤ張力の組合せを求めることは可能である [15]。ただしこれを満たす張力ベクトルの組合せは無数にある。

出力節がつり合いの状態にあるとき、ワイヤ張力の合力は「外力とつり合う力」と「内力」を合わせたものと考えられる。いま、出力節がつり合いの状態にあり、外力とつり合う力と内力がそれぞれ目標値からある誤差を持っているとする。この状態で各ワイヤの張力を目標値に一致するよう制御すると、つり合いの式が成り立たなくなり、出力節は新たにつり合う位置まで移動してしまうドリフトが起こる [16]。

これに対しここでは、式 (3) を満たしながら内力を制御することで、ワイヤ張力の合力を維持したまま、間接的に内力のみを制御することを考える。内力を間接的に表現する物理量としてワイヤの平均張力に着目し、これの積分フィードバックにより平均張力を目標値に一致させる。この際、ワイヤ張力の合力を維持するために、つり合いの式を満たす各ワイヤの繰出量を計算する。

制御系のブロック線図を図2に示し、詳細を次節以降に述べる。

3.2 ワイヤ剛性の計算と静的ワイヤ伸び補償

まず、張力がかかった際のワイヤの静的な伸びについて、ワイヤの剛性を用いた簡便な補償を行う。

i 番目のワイヤについて、ウインチのワイヤ繰出し点から最終プーリまでのワイヤ長を $l_{sp,i}$ 、最終プーリから出力節ないしフィンとの接続点までのワイヤ長を l_i 、ロータリエンコーダの計測値から計算される l_i の計測値を $l_{m,i}$ とする。

このとき、 i 番目のワイヤの剛性 k_i [N/m] は、単位長さのワイヤの剛性 k_W [N/m] を用いて以下のように表せる:

$$k_i = k_W / (\lambda_{m,i} + \lambda_{sp,i}) \quad (4)$$

ただし、 $\lambda_{m,i}, \lambda_{sp,i}$: ワイヤ長 $l_{m,i}, l_{sp,i}$ [m] が単位長さの何倍かを表す無次元数。

これを用い、ワイヤの剛性からなる対角行列 \mathbf{K}_W を考え、ある張力 \mathbf{f} がかかったときの l_m を以下 $l_{m,cmp}$ のように補正する:

$$l_{m,cmp} = l_m + \mathbf{K}_W^{-1} \mathbf{f} \quad (5)$$

3.3 平均張力の積分フィードバック (ATFB)

後述するように、この制御系では計算トルク法により指令張力 \mathbf{f}_c を計算しており、これと張力センサより計測した実際の張力 \mathbf{f}_m との差の積分値にゲインをかけて張力の修正量を算出する。ただしここにおいて、ワイヤの剛性行列と構造行列から、張力の合力が変化しないよう修正する。

まず、張力の合力の変化 $-\Delta \mathbf{w}_P$ が $\mathbf{0}$ であるとき、張力の変化を $\Delta \mathbf{f}$ とすると、式 (3) より、

$$\mathbf{A}^T \Delta \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (6)$$

$$[\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \boldsymbol{\omega}_3, \boldsymbol{\omega}_4] [\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \Delta f_4]^T = \mathbf{0} \quad (7)$$

の関係がある。この式の両辺を Δf_4 で除してまとめると、以下が得られる:

$$[\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \boldsymbol{\omega}_3] [\rho_{\Delta f,1}, \rho_{\Delta f,2}, \rho_{\Delta f,3}]^T = -\boldsymbol{\omega}_4 \quad (8)$$

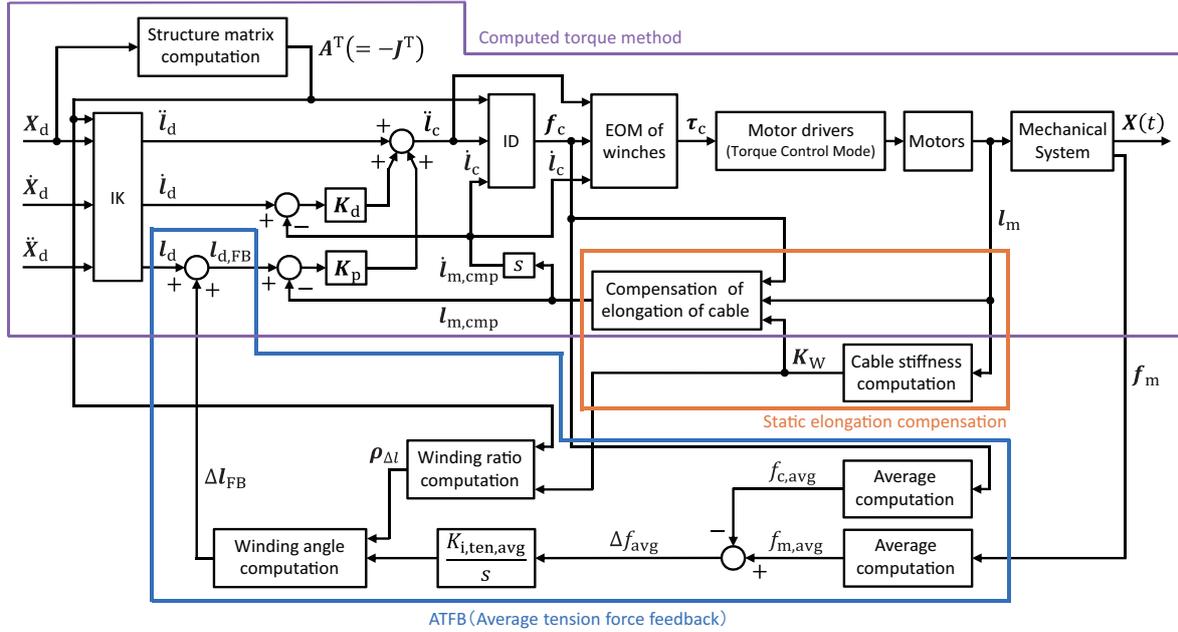


Fig.2 Block diagram.

ただし $\rho_{\Delta f,i} = \Delta f_i / \Delta f_4$ であり、これを各ワイヤの張力変化の4番ワイヤの張力変化に対する比を示すベクトル $\rho_{\Delta f}$ としてまとめると以下ようになる：

$$\rho_{\Delta f} = \begin{bmatrix} -[\omega_1, \omega_2, \omega_3]^{-1} \omega_4 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

この $\rho_{\Delta f}$ を満たすよう張力を変化させれば、張力の合力は変化しない。この条件において、各ワイヤの繰出量の4番ワイヤの繰出量に対する比を示すベクトルは以下の式を満たす：

$$\rho_{\Delta l} = K_W^{-1} \rho_{\Delta f} \quad (10)$$

これを用い、計測張力 f_m と計算トルク法の指令張力 f_c について、それぞれの平均値の差（平均張力誤差）

$$\Delta f_{avg} = \frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^4 f_{m,i} - \sum_{i=1}^4 f_{c,i} \right) \quad (11)$$

を計算し、この積分を用いてワイヤ長の修正量 Δl_{FB} を以下のように算出する：

$$\Delta l_{FB} = K_{i,ten,avg} \int \Delta f_{avg} dt \rho_{\Delta l} \quad (12)$$

ただし $K_{i,ten,avg}$ ：ゲイン。

3.4 計算トルク法による指令張力の計算

あらかじめ与えられた出力節の目標位置・姿勢 X_d とその速度 \dot{X}_d ・加速度 \ddot{X}_d から、逆運動学計算により目標ワイヤ長 l_d とその速度 \dot{l}_d ・加速度 \ddot{l}_d を得る。

次に、これらと伸び補償後の計測ワイヤ長 $l_{m,comp}$ を用い計算トルク法の制御則により指令ワイヤ長の2階微分 \ddot{l}_c を計算する。この際、目標ワイヤ長には前述の ATFB で計算されるワイヤ長修正量 Δl_{FB} を加える：

$$\ddot{l}_c = \ddot{l}_d + K_d(\dot{l}_d - \dot{l}_{m,comp}) + K_p(l_{d,FB} - l_{m,comp}) \quad (13)$$

ただし K_p, K_d ：フィードバックゲイン、 $l_{d,FB} = l_d + \Delta l_{FB}$ 。

次に、出力節の運動方程式を用いた逆運動学計算により、指令平均張力 $f_{c,avg}$ を与えたときの張力解を導出し、これを指令張力 $f_c = [f_{c,1}, f_{c,2}, f_{c,3}, f_{c,4}]^T$ とする。まず、出力節の運動方程式は以下で表される：

$$M \ddot{X}_c = w_P + A^T f_c \quad (14)$$

ただし、 M ：出力節の慣性行列、 \ddot{X}_c ：出力節の指令加速度。一方、指令平均張力 $f_{c,avg}$ について以下の式が成り立つ：

$$f_{c,4} = 4f_{c,avg} - f_{c,1} - f_{c,2} - f_{c,3} \quad (15)$$

これを式 (14) に代入して整理すると以下が得られる。

$$f_{c,123} = (B^T)^{-1} (M \ddot{X}_c - 4f_{c,avg} \omega_4 - w_P) \quad (16)$$

ただし $B^T = [\omega_1 - \omega_4, \omega_2 - \omega_4, \omega_3 - \omega_4]$ 、 $f_{c,123} = [f_{c,1}, f_{c,2}, f_{c,3}]^T$ 。

ここで、 \ddot{X}_c はヤコビ行列 J と指令ワイヤ長 l_c を用いて以下のように表せる：

$$\ddot{X}_c = J^+ \ddot{l}_c + J^+ \ddot{l}_c \quad (17)$$

ただしここでは $\dot{l}_c = \dot{l}_{m,comp}$ としている。

以上をまとめると、指令張力 f_c は以下のように計算できる。

$$f_c = \begin{bmatrix} (B^T)^{-1} (M \ddot{X}_c - 4f_{c,avg} \omega_4 - w_P) \\ 4f_{c,avg} - \sum_{i=1}^3 f_{c,i} \end{bmatrix} \quad (18)$$

3.5 ウィンチの動力学を考慮した指令トルクの計算

最後に、ウィンチの運動方程式を考慮し、張力のフィードフォワード項と慣性・粘性の補償項により指令トルク τ_c を算出する。

$$\tau_c = -\xi r_s f_c + \frac{1}{\xi r_s} (J_m \ddot{l}_c + D \dot{l}_c) \quad (19)$$

ただし、 ξ ：ウィンチの減速比、 r_s ：ウィンチのスパイラルプールのピッチ円半径、 J_m ：ウィンチの慣性モーメント、 D ：ウィンチの粘性係数。

4 剛性評価実験

提案手法による内力制御が剛性に及ぼす効果を実験的に確認するために、出力節に外力を加え、これにより生じる出力節の変位をモーションキャプチャを用いて計測する実験を行った。

ATFB を用いる場合と用いない場合について、位置制御により出力節を目標位置に停止させた状態で、出力節の重心から X 軸負方向に 0.2 m 突き出たバーの先端に、滑車とおもりを用いて Y 軸方向の力を加え、これにより生じる出力節の変位をモーションキャプチャを用いて計測した。

出力節の位置は作業領域の中央 (0.715, 1.72) とし、Y 方向の力と Z 軸まわりのモーメントを加えた際の実験結果を図 3 に示す。

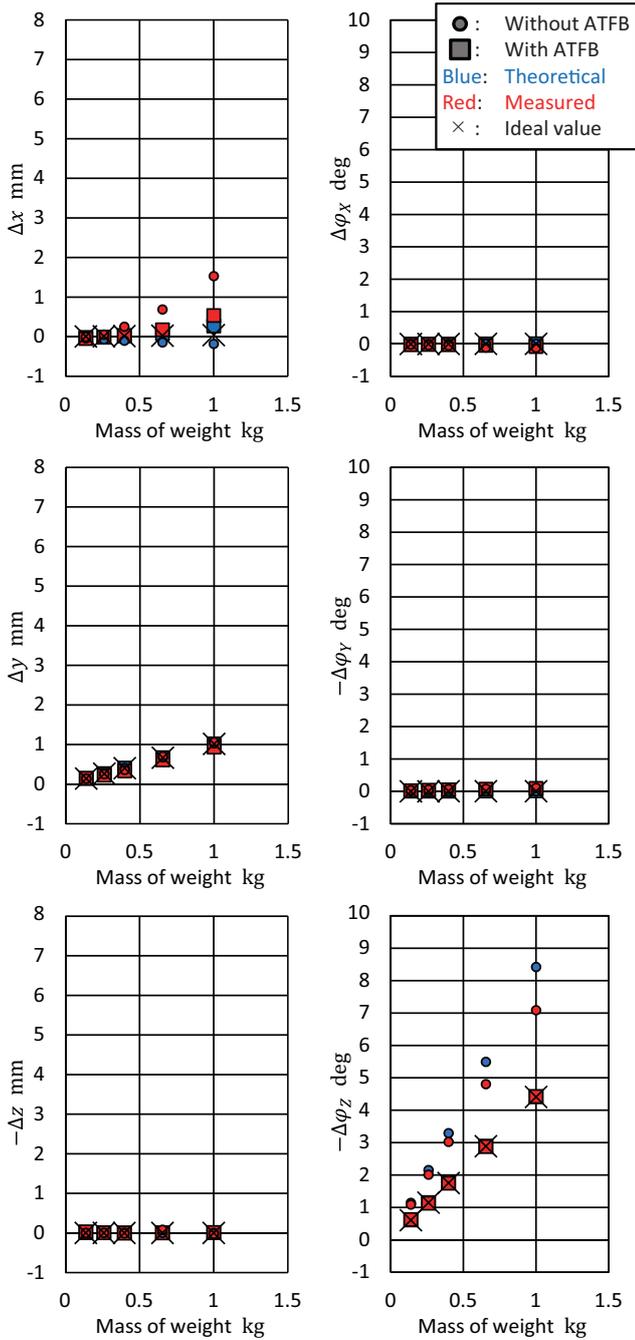


Fig.3 Experimental results of stiffness evaluation.

図中四角のプロットは ATFB を用いた場合、丸印のプロットは ATFB を用いない場合を示す。また図中赤のプロットは計測値、青は張力と出力節位置・姿勢の計測値から計算される剛性行列を用いて求めた理論値、×印は張力と出力節の位置・姿勢の目標値から計算される剛性行列を用いて計算した出力節の変位を示す。

まず、ATFB の有無について変位の計測値を比較すると、剛性が張力に依存する運動面外方向のうち X 方向と Z 軸まわりの変位が小さくなっており、剛性が向上していることがわかる。ATFB による剛性向上の効果を確認できた。

また、変位の計測値と目標値を比較すると、Z 軸まわりの角変位について、目標値に対する計測値の誤差が ATFB を用いない場合は 60%程度である一方、ATFB を用いる場合は 0.2%程度であり、よく一致していることがわかる。また、X 方向の変位についても ATFB によって誤差が小さくなっていることが確認できる。これらはすなわち、ATFB による張力誤差の改善により、運動面外方向の実際の剛性を目標値に近づけることができたことを

意味する。

最後に、変位の計測値と理論値を比較すると、Z 軸まわりの角変位について、ATFB なしの場合は理論値よりも計測値の方が小さい傾向がある。これは出力節に外力を加えたことで各ワイヤの張力が増加し剛性が高くなったためと考えられる。一方、ATFB ありの場合は計測値と理論値がよく一致している。これは、平均張力が一定に保たれるために、外力を加える前後で内力の変化がほとんど起こらず、剛性が維持されたためと考えられる。

5 結言

開発中の建物外壁検査用平面パラレルワイヤ駆動機構のために、平均張力の積分フィードバックにより張力の合力を維持しながら内力のみを制御することで所望の出力節の剛性を実現する制御系を提案した。この手法は、計算トルク法において目標ワイヤ長に平均張力の積分フィードバック項を加えるもので、特にこの際出力節におけるつり合いの式を満たすよう各ワイヤ長の修正量に配分するものである。小型実験機を用いた剛性評価実験により、剛性向上、張力誤差の改善とこれによる運動面外方向の剛性の高精度化の効果を確認した。

なおこの手法は内力を制御するものであるため、各軸まわりの回転剛性を個別に制御することはできない。実際の風荷重下でのタスク遂行のために、今後は例えばアドミタンス制御の考え方を流用することで、加わった外力レンジに応じた変位を発生するよう制御する手法との組合せなどについても検討を進める。

謝辞

本研究の一部は JST 研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 産学共同 (JPMJTR212A) の支援を受けて行われた。この場を借りて感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 森他, “ウォータージェットを用いた構造物の遠隔非破壊検査法”, コンクリート工学年次論文集, 38-1 (2016).
- [2] 遠藤他, “外壁タイル自動診断ロボットの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2007).
- [3] 土井他, “外壁検査システム「ウォールチェッカー (R)」の開発”, 大林組技術研究所技報, 83 (2019).
- [4] 石田他, “吸着脚をもつ壁面移動ロボットの姿勢に関する検討”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2009).
- [5] 大野他, “橋梁の近接目視点検を支援する飛行ロボットシステムの開発”, 精密工学会誌, 83-12 (2017).
- [6] 河辺ら, “壁面接触型ドローンによる外壁タイル張り仕上げの打音検査と打音の解析”, 材料施工 (2019).
- [7] Nakata, et al., “Development and Operation of Wire Movement Type Bridge Inspection Robot System ARANEUS,” Kalpa Publications in Engineering, 3 (2020).
- [8] J. B. Izard, et al., Integration of a parallel cable-driven robot on an existing building façade, *Proc. of the First Int'l. Conf. on Cable-Driven Parallel Robots* (2012).
- [9] M. Taghavi, et al., Cable-driven parallel robot for curtain wall modules automatic installation, *Proc. of the 35th Int'l. Symp. on Automation and Robotics in Construction* (2018).
- [10] 田上他, “パラレルワイヤ型位置決め機構の振動減衰性能向上に関する研究”, 機論, 78-785 (C) (2012).
- [11] 熱海他, “フィン状連鎖を有する水撃音響式壁面検査のための平面パラレルワイヤ駆動機構 (剛性行列に基づく解析と実験による剛性向上効果の評価)”, 第 20 回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会 (2021), 1207.
- [12] 武田行生, “パラレルマニピュレータの機構と特性”, 日本ロボット学会誌 (2012), 30-2.
- [13] D. Matsuura, et al., “Reproduction of long-period ground motion by cable driven earthquake simulator based on computed torque method,” *Proc. of the 4th Int'l. Conf. on Cable-Driven Parallel Robots* (2019).
- [14] A. Pott, “Cable-Driven Parallel Robots,” Springer (2018).
- [15] 立矢宏, “パラレルメカニズム”, 森北出版 (2019).
- [16] W. Kraus, et al., “System Identification and Cable Force Control for a Cable-Driven Parallel Robot with Industrial Servo Drives,” *Proc. of the IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Automation* (2014).