T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

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）
Title(English)	Planar cable-driven parallel robot with fin-like chains for water jet impact acoustic wall inspection (Evaluation of the stiffness enhancement effect through analysis based on stiffness matrix and experiment)
著者(和文)	熱海七都, 菅原雄介, 栃木渉, 武田行生, 柳田克己, 水谷亮, 三谷哲史, 片村立太
Authors(English)	Nanato Atsumi, Yusuke Sugahara, Wataru Tochigi, Yukio Takeda, Katsumi Yanagita, Ryo Mizutani, Satoshi Mitani, Ryuta Katamura
出典(和文)	機素潤滑設計部門講演会講演論文集, , , 1207
Citation(English)	The Proceedings of the Machine Design and Tribology Division meeting in JSME, , , 1207
発行日 / Pub. date	2021, 12

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

1207

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）

Planar cable-driven parallel robot with fin-like chains for water jet impact acoustic wall inspection (Evaluation of the stiffness enhancement effect through analysis based on stiffness matrix and experiment)

○学　熱海 七都[*1]，正　菅原 雄介[*1]，栃木 渉[*1]，正　武田 行生[*1]
柳田 克己[*2]，正　水谷 亮[*2]，三谷 哲史[*2]，正　片村 立太[*2]
Nanato ATSUMI[*1], Yusuke SUGAHARA[*1], Wataru TOCHIGI[*1], Yukio TAKEDA[*1],
Katsumi YANAGITA[*2], Ryo MIZUTANI[*2], Satoshi MITANI[*2] and Ryuta KATAMURA[*2]
[*1] 東京工業大学　Tokyo Institute of Technology
[*2] 鹿島建設株式会社　Kajima Corporation

The water jet impact acoustic method is the wall inspection method to detect the concrete flaking by analyzing the sound generated by the water hit on the structure. The authors are developing the completely constrained planar CDPR (cable-driven parallel robot) to move and position the device for this method facing the wall. In general, the planar CDPR has relatively low rotational stiffness about the axes on the motion plane, which gives a non-negligible effect on the positioning accuracy of the water jet. Therefore, in this paper, the fin-like chains which mechanically improve the rotational stiffness about the axes on the motion plane are proposed. They are rigid-body chains, which can rotate only around the normal axis of the motion plane. The effect of the mechanism is discussed through the analysis using the stiffness matrix and the stiffness measurement experiments using the prototype.

Key Words : Cable-driven parallel robot, Stiffness, Fin-like chains, Wall inspection, Water jet impact acoustic method

1. 緒　　言

建物外壁のタイルの剥離は落下事故の危険があるため，定期診断が義務付けられている．従来は，作業者がタイルをハンマーで叩き，これにより生じる音を耳で聞いて診断を行う打診法が多く用いられてきた．しかしこの方法では，作業者が高所で作業する必要があるため危険が伴うこと，診断を人の耳に頼っているため検査結果にばらつきがあること，検査に時間がかかることなどが問題となっている．これらを解消するために，定量的な検査が可能な検査装置と，その位置決めを行う装置を用いた壁面検査の自動化が望まれている．

定量的な検査が可能な検査手法の１つに，森らが開発した水撃音響法がある[(1)]．これは構造物に水撃を当てた時に生じる音響を解析することでその浮き・剥離を検知する手法である．水撃を用いるため強風下での使用には適さないが，壁面と装置が非接触のため壁面の障害物によらず検査可能であり，また高速で移動しながらの検査が可能である．

一方，検査装置の位置決めを自動で行う装置については，主としてロボットを用いたものが多く，以下のように分類できる．

a) 吊下げ式：屋上に設置したウィンチから繰り出されるワイヤで検査装置を吊り下げる方法[(2)(3)]
b) 壁面自走式：負圧等を利用して壁面に吸着し，これを自走するロボットに検査装置を搭載する方法[(4)(5)]
c) 飛行式：飛行ロボットに検査装置を搭載し，壁面にアプローチする方法[(6)(7)]
d) パラレルワイヤ式：パラレルワイヤ駆動機構の出力節に検査装置を搭載し，これを位置決めする方法

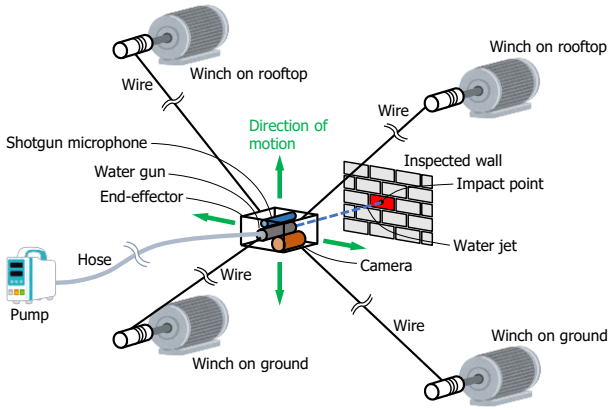


Fig. 1　Concept of planar CDPR for water jet impact acoustic wall inspection

この中で著者らは，d) に着目した．この方式は，移動ロボットと比べると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．

d) は，さらに懸垂型と完全拘束型に分けられる．前者は，上向きのワイヤのみを有するため低コストで，ウィンチの設置作業が容易である反面，剛性が低い．これが採用されている橋梁検査ロボット「ARANEUS」[8]は，壁面に接触して運用することを前提としており，これにより剛性の低さをカバーしているが，突出部のある建物の外壁に適用することは難しい．一方，後者は出力節が複数のワイヤによって完全に拘束されているため剛性が高い．特に，空間的にワイヤを配置する機構は高い剛性を確保しやすく，これを建物外壁の施工や検査に用いる研究がある[9][10]．しかし一般には，必要なウィンチとワイヤの数が大きく，いずれの研究でも 8 組が使用されている．一方，平面的にワイヤを配置する機構は特定の方向の剛性が低いが，検査装置の壁面内方向の位置決めを行うために最低限必要な平面 3 自由度運動を 4 組のウィンチとワイヤで実現できる．そのため，特定の方向の剛性が低いという問題を解決すれば，空間的な機構と比べて構造が単純で，コスト面に優れたシステムを実現できる．

そこで，定量的で高速な検査，長時間連続での運用による高い検査効率の実現をめざし，鹿島建設・東京工業大学・熊本大学は共同で，図 1 に示す完全拘束型の平面パラレルワイヤ駆動機構により水撃音響法のためのウォータガンとマイクロフォンの位置決めを行うロボットを開発している．この機構では，運動面の法線方向の剛性と運動面内の軸まわりの回転剛性が低い．前者については，水撃音響法はこの方向の精度が要求されないため問題とならないが，後者については水撃が壁面に当たる点（打撃点）の誤差に大きい影響を与えるため，この回転剛性を向上させる必要がある．

完全拘束型のパラレルワイヤ機構は内力が大きいほど剛性が高くなることが知られているが，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．この問題に対して，Shao らが提案する壁面清掃ロボット[11]は壁面に接触することによって運動面内の軸まわりの回転が生じないようにしているが，この方法を突出部のある壁面の検査に適用することは難しい．また，田上らが提案する電気式集塵装置内の電極板のモニタリングのためのカメラ位置決めシステム[12]は，ウィンチ 1 つにつき互いに平行な 2 本のワイヤを用いることでこの軸まわりの拘束モーメントを作用させ，これによって回転剛性を向上させているが，運動面の法線方向に出力節が肥大化し，またワイヤの増加によりコストが増大する．

そこで本稿では，内力によらず機構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，フィン状連鎖を提案する．また，これが剛性に及ぼす効果を剛性行列に基づく解析と実験により示す．

2.　フィン状連鎖の提案

2・1　コンセプト

平面パラレルワイヤ機構の運動面内の軸まわりの回転剛性は出力節のワイヤ接続点間の距離を大きくすることで向上させることができる．これは，運動面内の軸まわりの回転運動によるワイヤ接続点の変位が大きくなり，

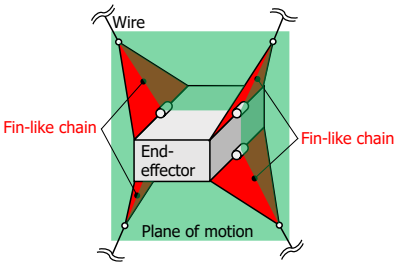


Fig. 2　Concept of fin-like chains

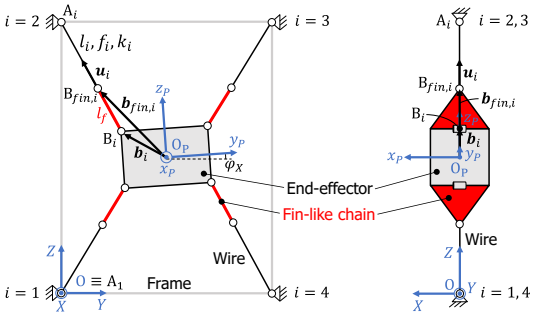


Fig. 3　Model of planar CDPR with fin-like chains

ワイヤの張力によって生じる外力に対抗するモーメントが大きくなるためである．単純に出力節の寸法を大きくすることでこれを実現できるが，作業領域が狭まるという大きな問題が生じる．そこで著者らは，出力節の寸法を大きくすることと同等の効果を得る方法として，図 2 に示す，運動面の法線軸まわりのみに回転可能な剛体の連鎖を提案する（フィン状連鎖と呼ぶ）．これを介してワイヤを接続することで，運動面内の軸まわりの回転運動に対しては，ワイヤ接続点間の距離が大きくなる．一方，運動面内の運動に対しては，運動面外方向の変位が生じない限り，フィン状連鎖はワイヤの一部としてみなせるため，この方向の剛性に影響を与えない．これにより，出力節を大きくすることなく運動面内の軸まわりの回転剛性を向上させることができる．なおこの手法を，前述の田川らの研究で見られるワイヤを1組2本とする手法と併用すると，より回転剛性を向上させることができる．

2・2　フィン状連鎖を有する平面パラレルワイヤ駆動機構のモデル

本機構の解析のためのモデルを図 3 に示す．A_iはワイヤの繰出し点，B_iは出力節とフィン状連鎖の接続点，$\mathrm{B}_{fin,i}$はフィン状連鎖とワイヤの接続点を表す．また，原点をA_1とする絶対座標系をO-XYZ (Σ)（YZ平面：運動平面），原点を出力節上の代表点とする出力節座標系を$\mathrm{O_P}$-$x_Py_Pz_P$ (Σ_P)とし，出力節のX軸まわりの姿勢角をφ_Xとする．ただし，X方向の変位やY,Z軸まわりの角変位が生じていない場合は，$\mathrm{B}_i, \mathrm{B}_{fin,i}, \mathrm{O_P}$はいずれも$YZ$平面内にあるとする．また，$\Sigma$上で，$\overrightarrow{\mathrm{O_PB_i}}$を$\boldsymbol{b}_i$，$\overrightarrow{\mathrm{O_PB_{fin,i}}}$を$\boldsymbol{b}_{fin,i}$，ワイヤの方向を表す単位ベクトルを$\boldsymbol{u}_i$とし，ワイヤの長さを$l_i$，ワイヤの張力を$f_i$，ワイヤを線形ばねとし，このばね定数を$k_i$とする．ただし，$i$はワイヤの番号を表す．

2・3　剛性行列の導出

出力節に加わる外力と，これにより生じる出力節の変位の関係を剛性行列を用いて表す．パラレルワイヤ機構の剛性行列は式（1）で表される[13]．ただし，$\boldsymbol{K}_{OS}$は剛性行列，$\delta\boldsymbol{y}$は微小なX,Y,Z方向の変位とX,Y,Z軸まわりの角変位からなる列ベクトル，$\boldsymbol{f}$はf_iからなる列ベクトル，$\boldsymbol{K}_C$は対角成分をk_iとする対角行列である．また，$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$は構造行列と呼ばれている，ワイヤの張力を出力節に加わる力とモーメントに変換する行列であり[13]，本機構の場合は式（2）で表される．

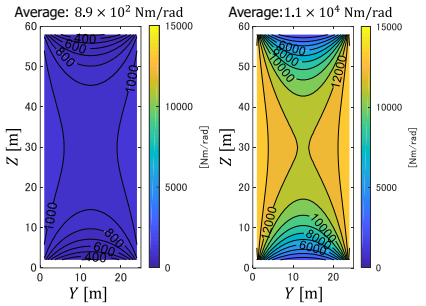
$$\boldsymbol{K}_{OS}\delta\boldsymbol{y} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}}{\partial \boldsymbol{y}}\boldsymbol{f}\delta\boldsymbol{y} + \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_C\boldsymbol{A}\delta\boldsymbol{y} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_1 & \cdots & \boldsymbol{u}_4 \\ \boldsymbol{b}_{fin,1}\times\boldsymbol{u}_1 & \cdots & \boldsymbol{b}_{fin,4}\times\boldsymbol{u}_4 \end{bmatrix} \tag{2}$$

2・4　フィン状連鎖が剛性に及ぼす効果

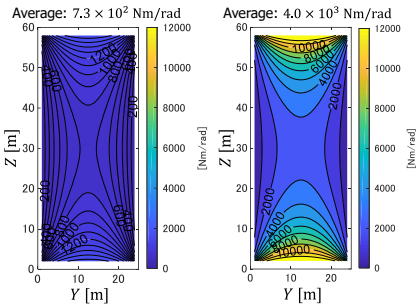
実際の壁面検査を想定した平面パラレルワイヤ駆動機構について，前節で導出した剛性行列に基づく解析を行い，内力を同じ値とした場合にフィン状連鎖の有無が剛性に及ぼす効果を確認する．

フレームの寸法は縦60 m×横25 mとし，作業領域はこれの上下2 mと左右1 mを除いた領域とした．また，出力節の寸法は縦0.17 m×横0.3 m，出力節の質量は10 kg，k_iはワイヤの単位長さあたりの剛性（実際の検査での



(a) Without fin-like chains (b) With fin-like chains

Fig. 4 Rotational stiffness about Y-axis



(a) Without fin-like chains (b) With fin-like chains

Fig. 5 Rotational stiffness about Z-axis

使用が想定されるワイヤを参考に1.84×10^6 N/mとした）をワイヤ長の単位長さに対する係数$l_i/1$ mで除した値，f_iは4本のワイヤの張力の平均値を3100 Nとした場合に静力学的につり合う値とした．ただし，$\varphi_X = 0$とした．

Y, Z軸まわりの回転剛性それぞれについて，フィン状連鎖がない場合とある場合（$l_f = 1$ m）の作業領域内の分布を図4，5に示す．これらから，Y, Z軸まわりの回転剛性はいずれも，作業領域全体でフィン状連鎖がある場合の方が高いことがわかる．

3. 剛性評価実験

3・1 実験概要

平面パラレルワイヤ駆動機構の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．特に，剛性行列を用いて計算される外力に対する変位の理論値と実験値について，長さの異なるフィン状連鎖を用いた場合の比較を行うことで，この寸法が剛性に及ぼす効果を確認する．

3・2 実験方法

本研究で用いた平面パラレルワイヤ駆動機構の小型実験装置の概要と寸法を図6に示す．床面付近の四隅にはそれぞれブレーキ付サーボモータで駆動されるウィ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．なお，ワイヤは合成繊維ロープであるダイニーマロープを使用した．出力節については，質量は3.5 kgであり，また上下のフィン状連鎖を交差させる設計とした．

まず，位置制御により出力節を$(Y, Z) = (1.180, 1.720)$ [m]に位置決めした後，サーボモータにブレーキをかけ，ウィンチを固定した．その後，出力節の重心からX方向に0.2 m突き出たバーの先端に質量0.138 kg～3.0 kgのおもりを吊り下げることで，Z方向の力とY軸まわりのモーメントを加え，これにより生じる出力節の変位をノビテック社製のモーションキャプチャシステムVENUS3Dを用いて計測した．なお，すべての実験を通して各ワイヤの張力がそれぞれ同程度となるように注意して実験を行った．

3・3 実験結果

フィン状連鎖の寸法が0.201 mと0.287 mそれぞれの場合について，各おもりを吊り下げたときのX, Z方向の変位とY, Z軸まわりの角変位の計測値を表1に赤の点で示す．また，2・3節で導出した剛性行列を用いて，おもりによる重力とモーメントから計算される変位の理論値を同表の青の点で示す．

ただし，剛性行列の計算には，張力については計測値，ワイヤの長さについてはモーションキャプチャにより計測された出力節の位置・姿勢から逆運動学により計算される値を使用した．また，ワイヤの剛性については，本装置の対角の2本のワイヤの先端を接続して張力をかけた状態で，接続点をワイヤと垂直な方向に引張る実験を行い，このときの力と変位の関係から同定した．ただし，この実験と剛性評価実験で外力を加える時間が同程度となるようにし，張力緩和によるワイヤ剛性のずれの影響が小さくなるようにした．同定したワイヤの単位長さあたりの剛性は1.53×10^5 N/mであり，これをウィンチから出力節までのワイヤ長の単位長さに対する係数で除した値をワイヤの剛性として計算に用いた．

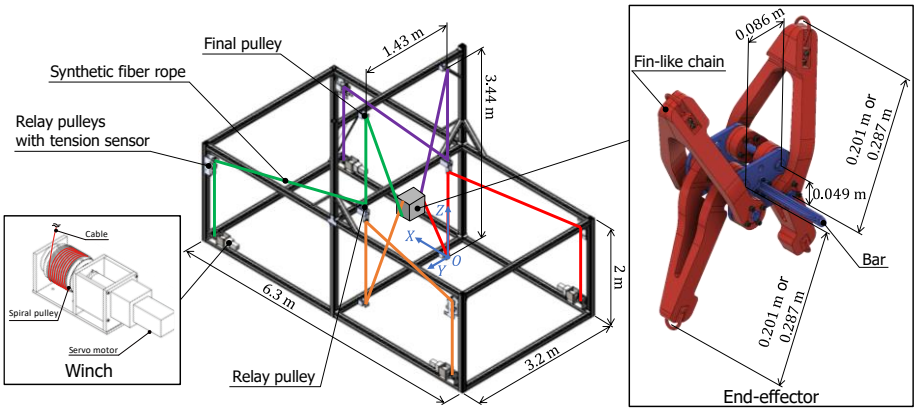
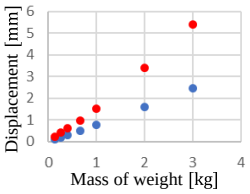
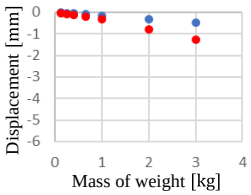
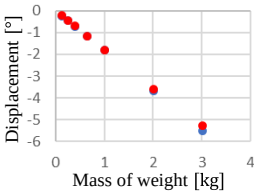
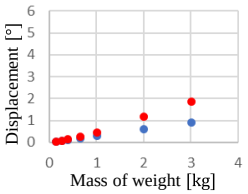
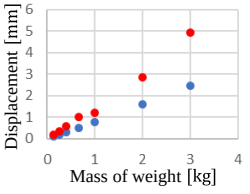
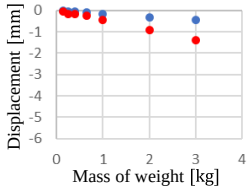
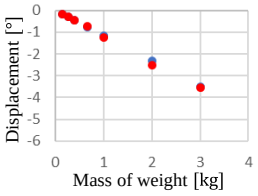
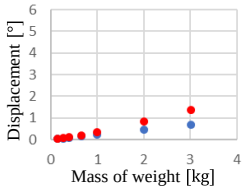


Fig. 6　Experimental equipment

Table 1　Displacement of the platform with fin-like chains (Red point: measured value, blue point: theoretical value)

	Displacement in X-direction	Displacement in Z-direction	Angular displacement about Y-axis	Angular displacement about Z-axis
Short fin-like chains (201 mm)				
Long fin-like chains (287 mm)				

3・4　考察

表 1 に示すとおり，理論値，計測値ともにフィン状連鎖の寸法が大きい場合の方が小さい場合と比べて，Y,Z軸まわりの角変位が小さい．このことから，これの寸法を大きくすることでY,Z軸まわりの角変位に関する回転剛性を向上できているといえる．一方，Z方向の変位についてはほとんど差がない．これは，2・1 節で述べたとおり，運動面内の運動に関する剛性にフィン状連鎖が影響を及ぼさないことを示している．

一方，変位の計測値と理論値を比較すると，加えているモーメントと同じ軸であるY軸まわりの角変位についてはよく一致している．一方，X,Z方向の変位はいずれも一様に計測値の方が理論値よりも大きく，誤差はそれぞれ最大で2.9 mmと0.8 mmであった．また，Z軸まわりの角変位も基本的には計測値の方が理論値よりも大きいが，おもりの質量が小さいときは値が一致しており，おもりの質量が大きくなるにつれて誤差の割合が大きくなる傾向が確認できた．これの誤差は最大で1.0°であった．

本機構ではその用途から打撃点の誤差に及ぼす影響が大きいY,Z軸まわりの角変位が重要である．これらの変位のうち，本実験で特に大きな変位が生じたY軸まわりの角変位について，計測値と理論値がよく一致していることがわかった．

一方，実変位の誤差の原因として，実験装置のフレームやウィンチ，出力節のたわみ，ワイヤ張力によるプーリの半径方向の変形，プーリのベアリングのガタなどが考えらえる．また，X方向の変位やY,Z軸まわりの角変位が生じることでワイヤが運動面から逸脱し，最終プーリ上でワイヤがX方向に滑ることで，ワイヤ繰出し点の位置がモデルとずれる結果，これらの変位が理論値よりも大きくなることが予想される．また，変位の計測値の誤差の原因としてモーションキャプチャの計測誤差が考えられる．一方，張力センサの計測誤差やワイヤの剛性モ

デルの誤差により理論変位に誤差が生じる．例えば，ワイヤの伸びは時間に依存するが，ワイヤの剛性モデルではその時間変化が考慮されていないため，出力節に外力を加える時間が長いほど，ワイヤの張力緩和によって変位が大きくなることが予想される．また，剛性行列の導出過程で変位を微小と仮定していることや，剛性行列が偏微分を用いて導出されることから分かるように，異なる方向や異なる軸まわりの変位が同時に生じることによる影響が考慮されていないことが原因として考えられる．

4. 結　　言

本稿では，完全拘束型平面パラレルワイヤ駆動機構の運動面内の軸まわりの回転剛性を機構的に向上させるフィン状連鎖を提案した．また，剛性行列に基づく解析を行い，フィン状連鎖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示した．さらに，試作機を用いた実験と剛性行列に基づく解析から，フィン状連鎖の寸法を大きくすることで運動面内の軸まわりの回転剛性が向上することを確認した．また，変位の実験値と理論値を比較することで，特に最も大きく変位の生じる方向の角変位について，これらがよく合っていることがわかった．

今後は，剛性行列の導出過程で変位を微小としていることや，同時に複数の変位が生じることを考慮していないことによるモデルのずれが変位の誤差に及ぼす影響を調べるために，これらを考慮した変位の解析手法について検討する．さらに，実際の壁面検査の際に出力節に加わる外乱の主な要因である風荷重について検討し，これにより生じる変位の解析に基づいた機構の設計を行う．

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．

文　　献

(1) 森他，“ウォータ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”，ROBOMECH 2007 (2007).
(3) 土井他，“外壁検査システム「ウォールチェッカー®」の開発”，大林組技術研究所技報，83 (2019).
(4) 髙松建設株式会社，“ロボットによる外壁点検システムを共同開発”，髙松建設株式会社プレスリリース (2019).
(5) 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”，ROBOMECH 2009 (2009).
(6) 二村他，“実大実験棟を活用したドローンによる点検の有効性の検証とドローンによる点検方法の確立のための実験の報告”，日本建築学会技術報告集，25-59 (2019).
(7) 眞方山他，“ドローンに搭載した赤外線装置による外壁調査手法の実証実験”，日本建築学会技術報告集，27-65 (2021).
(8) Nakata, K. et al., “Development And Operation Of Wire Movement Type Bridge Inspection Robot System ARANEUS”, Kalpa Publications in Engineering, 3 (2020).
(9) Izard, J.B. et al., “Integration of a Parallel Cable-Driven Robot on an Existing Building Façade”, In: Bruckmann T., Pott A. (eds), First International Conference on Cable-Driven Parallel Robots (2012).
(10) Iturralde, K. et al., “A Cable Driven Parallel Robot with a Modular End Effector for the Installation of Curtain Wall Modules”, Proc. of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (2020).
(11) Shao, Z. et al., “Design and analysis of the cable-driven parallel robot for cleaning exterior wall of buildings”, International Journal of Advanced Robotic Systems, 18-1 (2021).
(12) 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 C 編，78-785 (2012).
(13) Pott, A., “Cable-Driven Parallel Robots”, Springer (2018).