

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04277

研究課題名（和文）極限環境での回転計測システム提案とマルチボディダイナミクスによる運動解析と最適化

研究課題名（英文）Proposal of Rotational Measurement System in Extreme Environment and Multi-Body Dynamics for Motion Analysis and Optimization

研究代表者

菅原 佳城（Sugawara, Yoshiki）

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：10422320

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：核融合炉内のロボットシステムのための回転角計測センサとして、圧電素子を貼付けた柔軟梁に回転軸と結合した偏心カムを接触させ、回転量に応じた梁の変形により発生する圧電素子の電圧から回転角を計測する方法を提案した。また、提案システムの複数の組み合わせや、カルマンフィルタ、チャージアンプの導入によりロバスト性を付与する方法を提案した。また、提案法では計測軸の角速度によってはカムと梁の間に離脱と衝突が発生し計測精度へ影響を及ぼす。そこで、本研究ではマルチボディダイナミクスとノンスムーズダイナミクスに基づいて接触を有する柔軟構造の定式化および解析手法を提案し、基礎実験によりその有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、急速に実用化を目指した動きが活発化している核融合発電は、主にその発電の実証や能力向上についての着目した研究が多いものの、実用化に必須の保守・管理に関する研究は極めて少なく、本研究は核融合発電の実用化に伴う課題解決に寄与する。また、本研究で提案する計測システムにおいて発生するノンスムーズな接触を伴う柔軟構造物の運動に対して、一解析手法の提案および実験検証を行っており、まだ未確立の問題に対して一案を提案していることから、同分野において意義のある結果である。また、本解析手法は本計測システムに限らず、様々な産業界で現れる現象に適用できる可能性が高く、より一般的な展開につながる成果である。

研究成果の概要（英文）：As a rotation angle measurement sensor for a robot system in a nuclear fusion reactor, this research proposed a method of measuring the rotation angle from the piezoelectric voltage generated by the deformation of a flexible beam to which a piezoelectric element is attached and an eccentric cam coupled to the rotation axis. This study also proposed a method to add robustness by combining several of the proposed systems and introducing a Kalman filter and a charge amplifier. In the proposed method, depending on the angular velocity of the measurement axis, detachment and collision may occur between the cam and the beam, affecting the measurement system. Therefore, a formulation and analysis method for flexible structures with contact based on multi-body dynamics and non-smooth dynamics was proposed, and the effectiveness of the proposed method through basic experiments was demonstrated.

研究分野：機械力学，マルチボディダイナミクス

キーワード：計測 回転 圧電素子 極限環境 ノンスムーズ 柔軟構造 マルチボディダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

将来の核融合プラズマ装置の定常的な運用のためには、核融合炉内の各機器の保守管理が重要であり、保守管理用のロボットシステムの実現が強く要求されている。しかしながら、炉内は「高真空」、「大きな温度差」、「強磁場」、「高放射線」といった機械にとって非常に厳しい環境であり、ロボットシステムの実現は容易ではない。現在の実験用核融合炉でも炉内で簡単な動作を行う機械システムが導入されており、炉内の環境に耐えられるアクチュエータとして圧電素子に基づくものなどが使われているが、センサについては信頼性ある方法が確立してはいない。一方、回転に関する汎用的なセンサの代表的なものとして以下の表1のような2つが挙げられる。表1のように汎用的方法に見られる炉内環境に対する弱点を克服した回転計測方法が望まれる。

表1 回転計測のための代表的なセンサ

光学式ロータリーエンコーダ	構成要素の半導体は放射線環境に弱い。
可変抵抗式ロータリーエンコーダ	金属同士の接触部を有し、真空環境で蒸着の可能性がある上に、計測可能な回転角に制限有り。

図1に本研究における提案方法の基本原則を示す。計測する回転軸へ接続された軸を持つ偏心カムに対し、圧電素子を貼付けた柔軟梁が変形状態で接触している。計測軸に接続された偏心カムが回転し、その結果として柔軟梁の変形量の変化に伴い現れる圧電素子の出力電圧の変化から軸の回転量を読み取ることができる。一方、提案システムの実用化のためには下記課題を解決する必要がある。

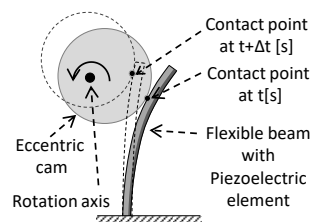


図1 回転角計測のための提案する基本原則

【課題1】 基本原則に関する理論的解析：炉内の高真空に起因する放電現象防止のために高電圧を回避し、計測誤差の影響低減のためにも低電圧を回避する必要がある。また、炉内の大きな温度差に起因する構成部品の熱変形による計測誤差の発生が予想される。このような炉内環境に応じて発生し得る計測誤差等の評価と改善法検討のために提案法に関する理論解析を行う必要がある。

【課題2】 炉内環境に適応したシステム設計と製作および最適化：前述の【課題1】に関連して高い精度かつ信頼性のある計測を実現できる最適なシステム構成を構築する必要がある。さらに、想定される計測誤差に対しロバスト性を有する構造を決定する必要がある。また、提案システムを特徴付ける様々なパラメータを考慮した全体的な最適化の可能性を明らかにする必要がある。

【課題3】 柔軟構造部の離脱・衝突・接触点移動を伴う振動問題：提案システムでは柔軟梁が周期的に変化する外力により強制的な加振を受けているとみなすことができる。さらに柔軟梁とカムは接触しているのみであり、応答によっては柔軟梁とカムの離脱・衝突が発生することが考えられる。また、システムの構造上接触点も移動する。このような状況では回転角と発生電圧が一对一で対応しないことから、梁とカムに関して離脱・衝突・接触点移動を含む振動現象の特性の解明のための定式化が必要となる。

2. 研究の目的

提案システムについて、出力電圧の最適化、小型化、摩擦の低減、計測誤差へのロバスト化等を主要な目標としてプロトタイプ的设计および製作を行い、その特性の把握と評価を目的とする。また、本提案システムは炉内環境下で動作するロボットシステムのための汎用的機器の開発であり、運用状態に近い炉内で使用可能なシステム構築の研究例は極めて少なく、そのような環境での使用に焦点をあてた設計の最適化や評価を行う。また、柔軟梁と剛体である偏心カムの離脱・衝突・接触点移動を含む接触現象については様々な研究が行われているが、その手法は確立されていないため、システムの動特性を把握することを目的として、そのような現象に対しマルチボディダイナミクスに基づく方法を用いて数学モデルと挙動解析の提案を行う。

3. 研究の方法

(1) 基礎検討用のプロトタイプ構築と理論解析および基礎実験による特性把握

図1に示した基本原則に基づき、回転計測可能なシステムのプロトタイプ(図2)の設計と製作を行う。プロトタイプは提案システム、モータ、光学式エンコーダの各軸が接続されており、低速で回転するモータの回転角を提案システムにより読み取るとともに、汎用的方法である光学式エンコーダによる計測情報と比較することで、提案システムの計測精度の評価を行う。

(2) システムのロバスト化とそれを実現する構造のシステムの設計と製作

上述の(1)で構築したシステムについて把握した特性から、極限環境で想定される計測に対する外乱に対してロバスト性を有する計測システムおよび原理の検討を行う。また、そのロバスト化に対するシステムの改修と基礎原理の検証実験を行い、提案手法の有効性の確認を行う。

(3) 離脱と衝突が発生する際の現象把握と解析手法の提案

本研究で提案する基本原則および前述の(1)で構築するモデルは低速回転の場合に対する

検討であり、提案システムの適用範囲をより拡大することを想定すると、高速回転時の特性を把握する必要がある。このとき、高速回転によってカムと柔軟梁の間に離脱と衝突が発生し得る。さらに、カムの偏心や柔軟梁の変形モードに起因して接触点の移動も伴う。この現象は本手法における計測精度に影響を及ぼす。そこで、(1)で構築するシステムに対して、マルチボディダイナミクスを用いることで、剛体と柔軟体に対する離脱・衝突・接触点移動を伴う数学モデルと解析法の提案を行う。このとき、数学モデルの構築では、接触に関わる構造物の幾何学的形状が大きく変化しないことからその幾何学的情報を用いて接触点決定を行い、接触点における衝突時の解析についてはノンスムーズダイナミクスで用いられる方法を応用した解析手法を導入する。

4. 研究成果

(1) 基礎検討用のプロトタイプ of the construction and theoretical analysis and basic experiment for characteristic grasping

図3に提案手法の基礎検討用モデルの基本構成を示す。この機構は、回転する板カムと柔軟梁に貼り付けられた薄板状の圧電素子で構成される(図4)。圧電素子は片持ち梁として利用し、先端部を常にカム側面へ接触させる。カムの回転によりその中心からの半径が変化するため、圧電素子の先端部も同様に変位を受ける。その結果、圧電素子はAからBの状態へ、もしくはBからAの状態へと変形し、その際の変形により発生する電圧からカムの回転情報を得る。

提案手法において、カムの回転角に対応する圧電素子の出力電圧を理論的に導出する必要がある。このとき、圧電方程式を用いて先端変位-出力電圧関係式を導出し、続いてカムと圧電素子の接触点を考慮することにより、カムの回転角と出力電圧の関係を記述することができる。その結果として、圧電方程式から、出力電圧とひずみの関係は比例関係となることが容易に示される。

提案手法の基礎的検証のために、図3に基づく実験装置を構築した。設計・製作したプロトタイプを図5に示す。プロトタイプは超音波モータ、回転軸、板カム、圧電素子であるユニモルフ、光学式エンコーダで構成される。ユニモルフは2軸ステージに固定されており、押付け量が調整可能である。最下部に設置されたモータにより軸と板カムが回転し、軸の回転は光学式エンコーダによって測定する。その値を圧電素子の出力電圧値から計算された回転角と比較することで提案手法の有効性を評価する。また、カムの半径は20mm、偏心量は1mmである。圧電素子の電圧から推定した回転角とエンコーダによって計測した回転角の比較を図6に示す。横軸は計測時間[s]、縦軸はカム回転角[deg.]と出力電圧[V]である。実線は回転角の推定値、破線はエンコーダの回転角、点線は出力電圧である。両結果は概ねよく一致している。しかし、出力電圧の勾配が小さい区間における提案手法での角度推定値には出力電圧の僅かなノイズの影響が現れておりその改善が今後の課題である。以上の結果は、1章の【課題1】に対する成果に該当する。

(2) システムのロバスト化とそれを実現する構造のシステムの設計と製作

圧電素子の変形により発生した電荷が静的状態の継続に伴い回路中に流れ出すことによって、カムの回転により発生する圧電素子の電圧計測に影響を及ぼす。そのため、ロバスト化の一つとして様々な帯域での計測を可能にするためにも、静的感度を与える必要がある。そこで、本研究では、従来法として用いられているチャージアンプ回路を用い、積分補償法を用いて圧電素子に静的感度を付与する。また、提案システムによる計測誤差を低減するために、図3に示す基本検討用モデルを90度ごとに配置したシステムを導入する(図7)。このとき、配置による位相および梁先端と圧電素子の出力電圧の関係を考慮し、個々のユニモルフ i ($i=1, 2, 3, 4$)が出力する電圧 V_i とし、対面するユニモルフ1と3の電位差 V_{13} とユニモルフ2と4の電位差 V_{24} の電位差から回転角は $\theta = \tan^{-1}(V_{24}/V_{13})$ により導出することができる。この結果は、各要素の振幅が等しけ

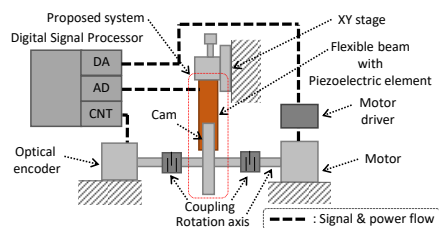


図2 提案システムのプロトタイプ

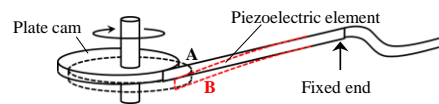


図3 基礎検討用モデルの基本構成

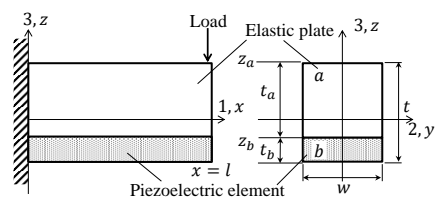


図4 ユニモルフ型の圧電素子

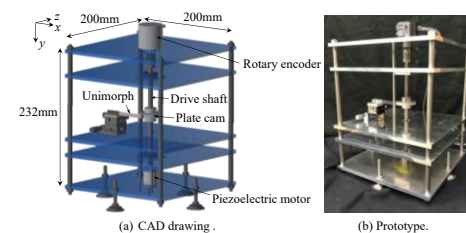


図5 基礎検討用プロトタイプ

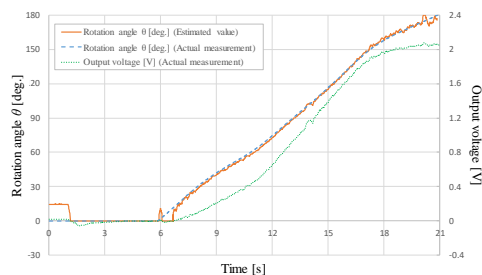


図6 実験結果

れば、出力電圧の振幅が θ に影響を与えないことを意味しており、それぞれのユニモルフが空間的に均一な環境にあれば、周辺環境の時間変化による影響を打ち消せる可能性がある。それゆえ、システムが設置されている温度環境の様な変化による構成部品のわずかな膨張や収縮が発生しても、上記の関係を用いる限りその影響は無視できることになり、限定的ではあるが極限環境での使用に対するロバスト性を与えることができる。

上記の方法について図5のシステムを用いて検証実験を行った。この際、1つの基本検討用モデルのデータを利用して4つの基本検討用モデルのデータを仮想的に作成したものをを使用した。また、外乱の影響低減のために拡張カルマンフィルタ(EKF)を導入した結果も合わせて、図8に実験結果の絶対誤差を示す。実験ではカムを一定の角速度(55.6[deg./s])で回転させ、60秒間のデータを計測した。赤の実線は、生データから算出した回転角度とエンコーダで取得した回転角度の誤差である。これは、各ユニモルフの振幅成分の差に起因しており、図7の構成では排除しきれない誤差である。一方、青い破線は、RawデータからEKFで導出した回転角度と、エンコーダで計測した回転角度の誤差である。EKFは振幅成分の差を考慮して設計したため、振動的な挙動が抑制され、その平均絶対誤差は-0.09度、最大絶対誤差は5.79度となり、Rawデータに比べ誤差を抑制できた。また、EKFモデルの改良により推定精度をさらに向上できる可能性があり今後の課題である。

次に、図7に対応するシステムの試作を行った。図9に試作したシステムを示す。研究期間終了時点で柔軟梁とカムの接触部の精度の課題もあり、十分な検証には課題はあるものの機能を確認できている。今後は接触部の高い精度と耐久性を実現するための改良とその評価が課題である。また、以上の結果は、1章の【課題2】に対する成果に該当する。

(3) 離脱と衝突が発生する際の現象把握と解析手法の提案

基礎検討のために接触点の移動が発生しないものとし、柔軟梁と剛体が接触する一般的なシステムとして定式化の手法を検討した。このときの対象モデルを図10に示す。図10は根本がピン支持されており、梁および剛体は一般的な材料特性とする。ピン支持である理由は、後の実験検証のしやすさからである。接触の定式化のために変形を許容しないノンスムーズな方法を導入する。ここで、梁は絶対節点座標法(ANCF: Absolute Nodal Coordinate Formulation)により定式化を行い、接触についてはPfeifferらによるユニラテラル接触を線形相補性問題(LCP: linear complementarity problem)へ帰着する方法を(Pfeifferら, 1996)採用する。このとき、ANCFから得られる運動方程式は運動学ベースのものであり、接触問題の導出に必要な関係式は運動学ベースのものであり定式化において注意を要する。ここで梁に対しANCFを用いて定式化すると次式となる。

$$\hat{\mathbf{M}}_{in} \ddot{\mathbf{q}}_{in} + (\hat{\mathbf{R}}_{l2in} + \hat{\mathbf{R}}_{t1in}) \mathbf{q}_{in} = \hat{\mathbf{Q}}_E \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{q}_{in} は一般化座標、 $\hat{\mathbf{M}}_{in}$ は慣性行列、 $\hat{\mathbf{R}}_{l2in}$ および $\hat{\mathbf{R}}_{t1in}$ はそれぞれBerzeriらによって提唱された軸方向の変形のためのL2モデルによる軸剛性とT1モデルによる曲げ剛性行列(M.Berzeriら, 2000)、 $\hat{\mathbf{Q}}_E$ は外力ベクトルである。一方、剛体の方程式は

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{h} - \mathbf{W} \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0} \quad (2)$$

であり、 \mathbf{q} は一般化座標、 \mathbf{M} は慣性行列、 \mathbf{h} は接触力以外の外力ベクトル、 \mathbf{W} はヤコビアン、 $\boldsymbol{\sigma}$ は接触力である。ここで、Pfeifferらのユニラテラル接触の考えに基づけば、式(2)を積分した形の式を用いて衝突・接触現象を記述し、その際にLCPを用いて衝突・接触に関わるパラメータ導出する。このとき、導出されるものは衝突・接触において作用する接触力である $\boldsymbol{\sigma}$ に関する力積となり、運動学に関するパラメータである。また、LCPを解く際には、衝突・接触する物体のそれぞれの質量が必要となるが、剛体については定義できるものの、柔軟梁の接触に関わる質量を定義することは困難である。そのため、解決すべき課題は「課題①: 衝突・接触が発生した際の柔軟構造物に対する相当質量にあたるものを決定する必要がある。」と「課題②: 衝突・接触の

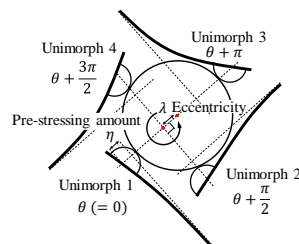


図7 基本要素の4組構成システム

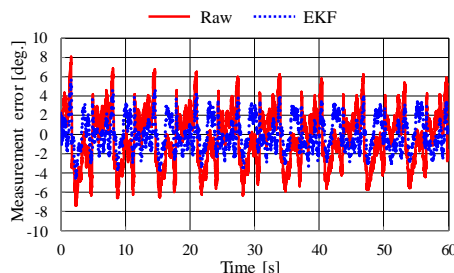


図8 4組構成システムでの実験結果

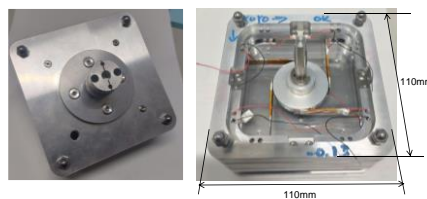


図9 4組構成システムの試作品

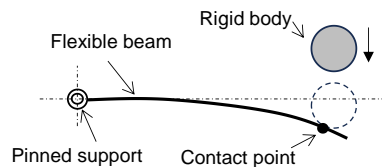


図10 離脱と衝突が発生する柔軟体と剛体

LCP を解いた結果として導出されるものは運動学ベースのもの（力積）であり、ANCF で得られた運動方程式である動力学ベースの関係に反映させる必要がある。」である。

本研究では課題①について 1 次モードを仮定した相当質量を導入し、さらにその相当質量と剛体との衝突問題を解く際にガラキン法の考え方に従い、対象とする 1 次モードの速度変換が行われたものとして衝突・接触の処理を行うことで②の課題に対する対応案とする。まず、課題①への対応として、相当ばねと相当質量を導入し、1 自由度系として捉えると相当質量は $m = 3\rho AL/(\beta L)^4$ となる。ただし、 ρ は梁の密度、 A は梁の断面積、 L は梁の長さであり、ピン支持としていることから $\beta L = 3.93$ である。次に、課題②への対応として D. J. Wagg ら (2002) のガラキン法に基づく nonsmooth な力を扱う手法を導入し、変形および振動現象が各固有モードの重ね合わせで表現されることを利用して、衝突点のみについて衝突・接触の影響を考慮した速度変化を仮定し、その他の点での速度変化は生じないとする。各モードについて独立に運動を考慮する。その結果、相当質量 m を用いた LCP によって得られた衝突・接触に伴い発生する力積を Σ とすれば、衝突・接触点における衝突・接触後の速度 v_2 は衝突・接触前の速度 v_1 と Σ および m を用いて $v_2 = \Sigma/m + v_1$ で与えられる。

また、剛体に関しての衝突・接触による影響は通常のユニラテラル接触の考え方にに基づく方法により LCP の球解によって得られた Σ を用いることで、衝突・接触後の運動を求めることができる。数値積分の各ステップで衝突・接触を判定された場合は上記の手続きによって柔軟梁および剛体の状態を更新することで、それぞれの運動への影響を解析しつつ時刻歴応答を導出することが可能となる。また、Wagg らの方法を用いれば接触点の位置も与えることができるため、前述のような本研究のシステムにおいて発生する接触点の移動も考慮できることになる。

本研究におけるカムと柔軟梁を用いたシステムを対象とすると、摩擦力も含めたモデル化を評価する必要があり、初期検討を目的として衝突・接触に対して焦点を当てた評価をするためにも、検証の行いやすいシステムを導入する。本手法がターゲットとするシステムには断続的に衝突・接触が発生する。そのような挙動が現れるシステムとして図 11 に示す柔軟梁の先端に紐が付いたシステムを導入することができる。これは、研究代表者らの論文(S. Oshima ら, 2022)による結果に基づけば、本計測システムと同等の評価ができるシステムである。また、本研究における計測システムを構成する柔軟梁は根本を固定支持されているものの、図 11 のシステムはピン支持となっている。これは、固定支持の場合には接触点における衝撃荷重の方向が限定的となり、その結果として発生する運動も限定的となることから、より一般的なシステムへの拡張とその評価および実験検証のしやすさを意図したためである。

先述の方法の有効性を評価するために、表 2 に示すパラメータで解析を行った。また、簡易的な装置を作成して、実験結果との比較を行った。解析および実験では同じパラメータおよび初期条件としている。図 12 に実験装置、実験および解析結果の比較を示す。図 12 の実験および解析結果は梁の先端と剛体の軌跡を初期状態から描いたものである。図 12 から明らかのように、柔軟梁に衝撃的な力が連続的に加わる状況において、実験もシミュレーションも定性的に一致する運動となった。また定量的にも大きく差があるわけではなく、比較的一致している結果と言える。以上の結果より、提案した方法は改善の余地はあるものの、ある一定のレベルでは有効な方法であると言える。また、それぞれの結果の差は、解析において 1 次モードを仮定していることに起因していると考えられ、モード展開等による高次のモードを導入する方法が課題である。ANCF では基本的に非線形なシステムとして表現されることから、モード展開のような手法は容易ではない。しかしながら、研究代表者らのグループは ANCF に対するモード展開に関わる一手法を提案しており、本基盤研究の終了時点においてその展開を試みており解析における課題を抽出している。その課題に対する対応とその評価および技術的な成熟が今後の課題である。また、以上の結果は、1 章の【課題 3】の一部に対する成果に該当する。

表 2 解析パラメータ

Beam	Length×Height×Thickness	$L \times h \times w$ [m]	0.3×0.02×0.001
	Density	ρ [kg/m ³]	8800
	Young's modulus	E [GPa]	110
	Initial angle	θ [rad]	π
	Torque	τ [N·m]	0
Rigid body & String	Mass	m [kg]	0.06
	Wire	l [m]	0.3
	String repulsion coefficient	ε [-]	0.7
	Initial displacement	(x_0, y_0)	(-0.45, 0)
	Initial velocity	(\dot{x}_0, \dot{y}_0)	(0, 0)

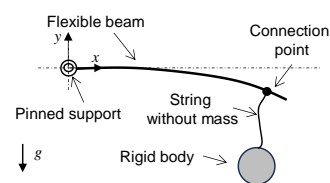


図 11 検証用モデルの模式図

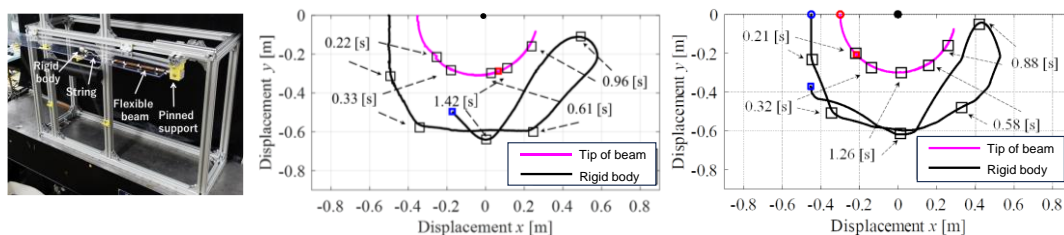


図 12 衝突・接触の解析法検証のための実験装置と実験および解析結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 OOSHIMA Shuntaro, SUGAWARA Yoshiki	4. 巻 8
2. 論文標題 Method for analysis of planar motion of system with rigid and extremely flexible components via analogy with contact problem of rigid bodies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 21-00015
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.21-00015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Maria Mikami, Takeshi Yamamoto, Yoshiki Sugawara, Masakazu Takeda
2. 発表標題 Motion Control of Mechanical Systems with a Cable Contacting the Ground
3. 学会等名 The 21st IFAC World Congress 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三上 真利亜, 山本 武志, 菅原 佳城, 武田 真和
2. 発表標題 接触力を受けるケーブルを有する機械システムの運動制御
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古田 宗太郎, 菅原 佳城, 坂間 清子
2. 発表標題 極限的環境下における機械システムのための回転角計測システムの提案
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Maria Mikami, Takeshi Yamamoto, Yoshiki Sugawara, Masakazu Takeda
2. 発表標題 Motion Control of Mechanical Systems with a Cable Contacting the Ground
3. 学会等名 21st IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 回転角度センサ及び回転角度検出方法	発明者 古田 宗太郎, 菅原 佳城	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2020-091266	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	武田 真和 (Takeda Masakazu) (40845640)	青山学院大学・理工学部・助教 (32601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------