

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月24日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560824

研究課題名（和文） 衛星搭載を目指したリアルタイム膜面形状計測法の確立

研究課題名（英文） Real-time Membrane Surface Shape Measurement Method toward Satellite Onboard

研究代表者

樋口 健 (HIGUCHI KEN)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60165090

研究成果の概要（和文）：

表面形状を計測する格子投影法は、液晶プロジェクタから明暗の縞である正弦波格子を物体表面に投影し、格子ゆがみをデジタルカメラで撮影し画像から格子位相を求める原理であり、短時間で安価にコンパクトに簡便に表面形状を高精度に計測する光学的手法である。宇宙用膜材として代表的な金属メッシュ、高分子膜、金属蒸着高分子膜などはこれらの計測手法に不向きと考えられていたが、提案した手法でしわを含む面形状計測できることを示した。また、大型宇宙構造物の軌道上表面形状計測を目指して、座標計測値を基準面の内挿法で求めていたものを外挿法に拡張することができ、リアルタイムで計測した。

研究成果の概要（英文）：

Grating Projection Method is a simple, compact, and low-cost method to measure a surface shape in a short period of time. A regularly sinusoidal light-dark stripe is projected from a PC projector, and the phase angle of the distorted stripe on an object surface is computed by a PC using the photographic image of a digital camera. Often used structural materials in space, such as transparent metal mesh, polymer film, and metalized polymer film, were thought to be ill-suited to the optical principle. The method developed here is shown to be suited to measure these materials, too. An interpolative method to compute the coordinate value of the surface framed in by two reference planes is extended to extrapolative range in order to measure a large space structures.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：構造・材料、計測システム、人工衛星、可視化、宇宙インフラ、計測工学、航空宇宙工学

1. 研究開始当初の背景

近年、宇宙用アンテナや太陽発電衛星、ソーラーセイルなどの宇宙構造物は、その性能

や機能を高めるために大型あるいは高精度であることが求められている。ロケットやスペースシャトルなどの輸送機で打ち上げられる

これらのシステムは、軽量で小さく収納できなければならず、メッシュや薄膜フィルムなどの膜面の利用が不可欠である。圧縮剛性がほとんどない膜面構造物では、シワやタルミといった不安定現象の発生領域や程度を予測することが実用上極めて重要であるにも関わらず、難解な研究課題となっている。シェルの分岐座屈解析や張力場理論など、膜面構造物の静的・動的挙動を解析する数値計算手法は近年目覚ましい発展が見られるが、その妥当性を示す実験はほとんどない。その理由のひとつに、膜面形状の高速かつ高精度な計測技術が未確立であることが挙げられる。

2. 研究の目的

本研究は、宇宙膜面構造物の基本構成要素として考えられる膜材を対象に、所望の形状計測精度要求を満たす光学的計測法を確立するとともに、計測精度を維持しつつ数m規模の構造物の形状計測への拡張を試みる。特に、近年目覚ましい発展が見られる膜面構造の静的および動的数値解析手法の妥当性を示すために、対応する膜面構造物のダイナミクス実験にも適用可能な高速かつ高精度で簡便な形状計測法の確立を目指す。

本研究で適用する光学的手法は以下の2つの手法の組み合わせである。

・サンプリングモアレ法および位相シフト法：サンプリングモアレ法は、ワンショットで撮影された格子画像の位相を格子ピッチの数百分の1～千分の1の分解能で位相解析できる新しい手法である。位相シフト法は、計測対象の表面光学特性の影響を受けにくい位相解析方法である。

・全空間テーブル化手法：位相と空間座標の対応関係を全画素についてテーブル化することで、座標算出に要する時間が全くかからず、瞬時に3次元座標分布が得られる手法である。これら2つの手法を組み合わせることで、高精度かつ高速な3次元計測手法を実現する。また、カメラのレンズ収差に依存しないため、市販の液晶プロジェクタとデジタルカメラを利用した安価で簡便なシステムで、非常に高価な計測システムと同等の計測精度の実現を目指す。さらに、位相接続手法を導入することで計測レンジを拡大する手法を開発する。

本研究で適用する光学的手法は、投影格子の反射光を撮影して解析するので、計測対象の反射特性によって投影/撮影法や解析ソフトウェアのパラメータのチューニングが必要となる。宇宙膜面構造の素材として代表的な金属メッシュやポリイミド膜などは、本手法による従来の計測対象に比して透過率が高いため、本研究では、こうした膜材の計測に適した投影/撮影法やパラメータの確立を目指す。また、実際の宇宙膜面構造物は小さくて

も数mオーダーであるため、計測精度を維持したまま計測範囲を拡張する手法の開発も並行して実施する。

3. 研究の方法

従来マーカー貼付による代表点のみの計測であった宇宙膜面構造の形状計測において面の連続的な形状が取得できることは、世界的にも画期的である。また、ワンショット画像からの解析のため静的な形状計測だけでなく、膜面展開挙動や、シワやタルミなどの不安定現象の生滅過程を含む動的挙動の3次元形状計測が可能となる。特に膜面の動的挙動を対象とした数値解析手法の妥当性検証には、従来は異なる解析手法による計算結果の比較しか手段がなかったが、本研究成果により実験結果との比較が可能となり、解析手法の精度と信頼性をより高めることができるようにする。さらに汎用のプロジェクタやカメラ、データ処理システムのみから構成される簡便なシステムで高精度な計測を実現できるため、各機器の小型化等によって衛星搭載機器へ発展させ、軌道上で精密な膜面形状をリアルタイムで取得することも期待できる。これは、単に軌道上のモニタというだけでなく、膜面を含む柔軟構造物の軌道上でのアクティブ制御の実現に向けた基盤技術となる。

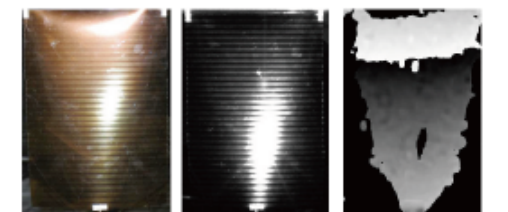
本研究で導入する光学的形状計測法は、液晶プロジェクタから2次元格子を物体に投影し、CCDカメラで撮影された2次元格子画像およびその位相を解析する。このとき、基準面を用いることによってレンズ収差の影響を受けない高精度な計測を実現する。さらにワンショットで撮影された格子画像から高精度に位相解析を行う「サンプリングモアレ法」(特願2008-113236)と基準面の情報をテーブル化することでリアルタイムに形状計測がおこなえる「全空間テーブル化法」(特願2007-127229)とを組み合わせることで高速な計測を実現する。また、位相を接続することで、計測精度を維持しながら計測範囲を拡張する。宇宙用膜材として代表的な、金属メッシュ、金属蒸着ポリイミド膜、ポリイミド膜は、いずれも上述の光学的形状計測法のこれまでの計測対象に比して透過率が高いため、格子投影法・撮影法・ソフトウェアのパラメータにチューニングが必要である。本研究では、こうした膜材を対象に所望の形状計測精度要求を満たすように計測法を改良するとともに、計測精度を維持しつつ、①動的挙動取得のためのリアルタイム計測技術、②大型構造物の計測技術を構築する。形状計測精度要求は、研究目的で述べた宇宙用アンテナにおける現状の計測精度を基準に設定し、計測対象の大型構造物には実際の宇宙用アンテナ開発に用いられた開発モデルとする。形状計測精度の確認には、厚みが既知のフィルム材で製作し

たリファレンスの計測のほか、静的形状計測ではレーザー変位計によるスキャン計測結果との比較を実施する。

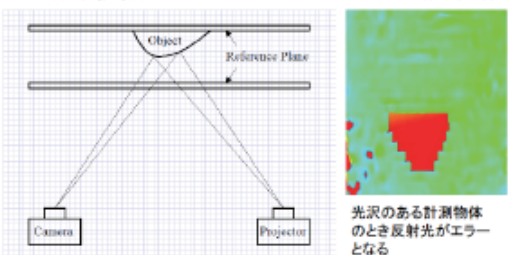
4. 研究成果

4.1 光沢のある膜材への格子投影法透過法

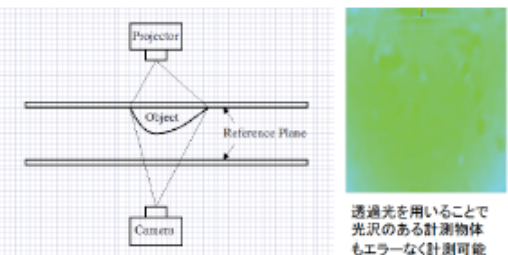
宇宙構造物は、収容寸法と重量に大きな制約があるロケットのフェアリング内に収めて打ち上げられ軌道上で所望の大きさにするため、必然的に展開構造物とならざるを得ない。そのため、軽量で収納性の良い膜面材料が多用されており、今後ますます膜面の利用が進むと考えられている。しかし、膜面展開構造物は、展開信頼性、展開後形状の再現性、展開後の剪断しわの発生による構造特性の大きな変化などの問題を潜在的に有しているため、軌道上展開挙動や展開後形状の把握の必要に迫られている。宇宙構造物に用いられる膜面は、ポリイミドに代表される高分子フィルム、金属蒸着した高分子フィルム、大型アンテナ反射鏡面の光透過性金属メッシュなどで構成されている。格子投影法サンプリングモアレ法は1枚のデジタル画像を撮影するだけで表面形状を算出できる迅速な手法であるが、高分子フィルムや金属蒸着高分子フィルムは光沢という強い反射（照かり）があるため、拡散反射光で格子を読み取る通常のサンプリングモアレ法では照かり部分でエラーが出るのが問題であった（図1(a)(b)）。そこ



格子を投影した膜 取得画像 解析された位相分布
(a) 格子投影法サンプリングモアレ法の測定手順



(b) 反射光を用いたサンプリングモアレ法の問題点



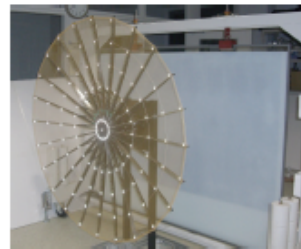
(c) 透過光を用いたサンプリングモアレ法の提案

図1 高分子フィルム表面形状の格子投影法による測定

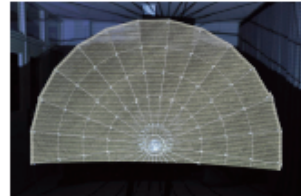
で、投影する格子の膜面反射光ではなく、膜の透過光を用いたサンプリングモアレ法を提案し、照かりがあっても格子画像を得ることができることを示し、その計測手法の有効性を示した（図1(c)）。

4.2 金属メッシュ素材への格子投影法の適用と大型構造物の表面形状計測

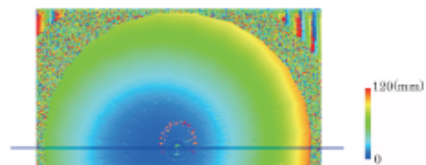
宇宙通信用アンテナや宇宙電波望遠鏡は、口径が大きいほどアンテナゲインや指向性が高くなるため、また使用する波長を短くするために、大型化と高精度化の一途をたどっている。したがって、軌道上での高精度な面形状計測が必須となっている。しかし、これらの反射鏡面は、衛星の姿勢擾乱源となる光圧を小さくするためと打ち上げ重量を小さくするために、光透過率が80%以上の金属メッシュで作られるため、透過性の大きい面の高精度面形状計測に軌道上で光学的計測手法を適用したいところではあるが適用が難しい。また、金属本来の光沢もあるため至る所で局所的にキラキラと輝く。そこで、実際に打ち上げを前提として開発された電波天文衛星ミッション（ASTRO-G）の大型アンテナの電波試験



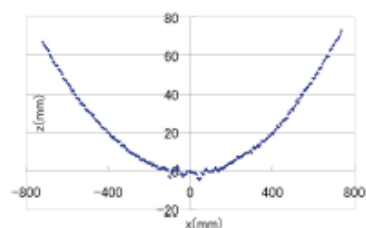
(a) メッシュアンテナ電波試験φ1500mmモデル



(b) 格子の投影



(c) 計測されたメッシュアンテナ深さ分布



(d) メッシュアンテナ切断面の深さ分布

図2 金属メッシュアンテナへの格子投影法位相シフト法の適用

モデルを計測供試体として用い、表面形状計測手法には輝度の局所的なピークに鈍感な格子投影法位相シフト法を試みた。ここでは、精度向上と計算時間短縮のために全空間テーブル化手法を用い、鏡面透過光が実験室の背景に反射して僅かな鏡面反射光と背景反射光とがカメラ画像上で合成されない機器配置を考案し、また供試体より大きい基準面を製作して、一度に表面形状を計測できることを目指した。その結果、金属光沢がありかつ光透過性の大きい金属メッシュ表面でも格子投影法で形状計測できる手法であること示し、宇宙での格子投影法の利用に大きく前進した (図 2 (a) (b) (c) (d))。

4.3 膜面のしわの計測としわ発生メカニズム追跡手法としての格子投影法

リアルタイムで面形状計測が可能な格子投影法の特性を生かし、膜面の構造要素としての利用に大きな障害となっているしわの形状計測とその発生メカニズムを追うことを目的として、矩形ポリイミドフィルムを剪断させてしわを発生させ定量的に計測する実験に格子投影法を適用した。これにより、数値シミュレーションが主流となっているしわ解析に必要なしわ形成過程の定量性のある実験データを与えることができた。その結果、ポリイミドフィルム表面の拡散反射や透過率は格子投影法の計測結果に影響を与えるものの、反射光を除去するよう光学系の配置を工夫すれば計測精度には大きな影響を与えないようにできることを示した。ポリイミドフィルムの光透過率は計測結果のバラツキに影響を与えるが、しわの生じた複雑な膜面形状であっても拡散反射の領域では格子投影法で計測が可能とし得ることを示した。また、バラツキを減じるために表面に艶消し処理を施し拡散反射を大きくしたポリイミドフィルムの実験により、局所的に生じた波長の短いしわの形状や応力場に影響されるしわの形成過程の違いを的確に捉えることができ、空間分解能の高い格子投影法による形状計測の有用性を確認した (図 3 (a) (b) (c) (d))。

4.4 大型構造物表面計測のための外挿法の開発と精度向上策

従来の格子投影法では2枚の基準面の間に計測対象を配置して計測する内挿法として存在していた。それに対して、2枚の基準面の外側に計測対象を配置すれば基準面よりも大型で遠い位置にある物体を計測できると考えられるが、計測対象の座標は基準面の座標値から外挿されるので精度低下も予想される。そこで、ここでは2枚の基準面の外側に計測対象を配置する方法を外挿法と呼び、外挿法での実験とその精度検証を行うとともに精度向上策を提案しその実用性を検討した。これ

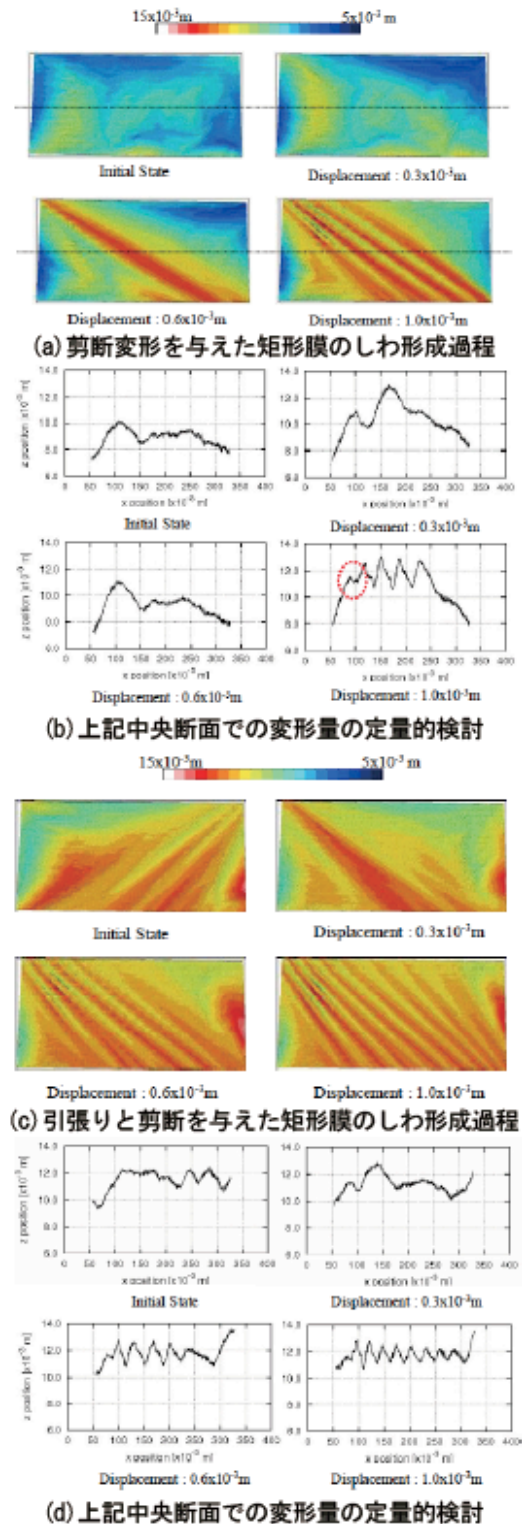
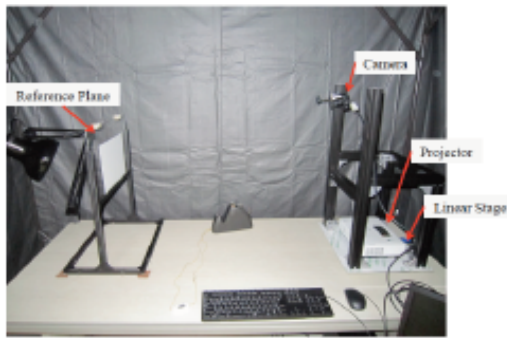
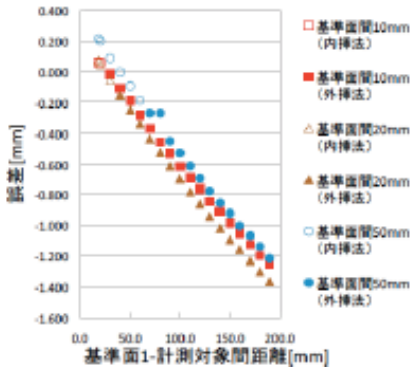


図 3 矩形膜のしわ形成過程のリアルタイム計測により宇宙空間での大型宇宙構造物の面形状計測を簡便にリアルタイムに行うことを狙った。

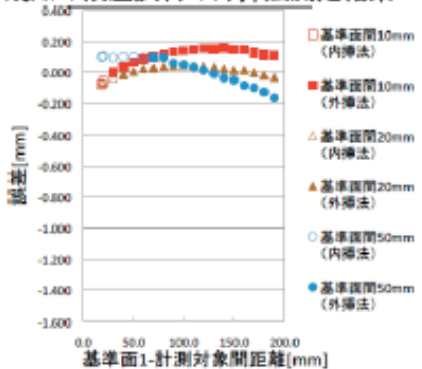
外挿法の手法提案と精度検証のための小型実験装置を図 4 (a)に示す。図 4 (b)は、高さ 5.494mmと既知である小型段差試料を、基準面間距離を10mm, 20mm, 50mmと変化させて段差を外挿法で測定したときの計測誤差を示した



(a) 外挿法小型対象物実証実験装置



(b) 既知の段差試料の外挿法測定結果



(c) キャリブレーションによる精度向上

図4 格子投影法の外挿法の開発

ものであるが、このままでは計測対象物が遠方に行くほど精度低下していることがわかる。計測対象物の表面の座標値は、2枚の基準面の座標値を基にして線形補間（ここでは外挿）して算出しているが、厳密には幾何光学的には計測対象物の表面の座標値は線形補間とは異なる。内挿法の場合には、線形補間であっても、基準面間隔を狭くしたり、基準面を多数にしたりすることにより精度向上できるが、外挿法の場合には線形補間ではずれが大きくなり精度低下を招いている。線形補間を多項式補間に変えると原理的には精度向上するはずであるが、多項式の係数決定に及ぼす計測誤差も蓄積されるため、計測対象物が遠方にある外挿法には必ずしも精度向上に寄与しなかった。この精度低下を改善するために、既知の位置にある平面を事前に細かく計測した結果を用いて計測データにキャリブレーションを施すことにより、線形補間による外挿法

でも内挿法と同程度の精度で遠方の表面を計測できることを示した（図4(c)）。

この結果、点情報ではなく面形状をリアルタイムで計測できる格子投影法に外挿法を適用することにより、大型構造物の面形状計測の有力な手法とすることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（既掲載は0件）

〔学会発表〕（計18件）

(1) 岩井達也, 三輪武史, 似鳥透, 樋口健, “大型宇宙構造物の面形状計測法としての格子投影法,” 第9回 HASTIC 学術講演会, 2012. 3. 11.

(2) 三輪武史, 岩井達也, 似鳥透, 樋口健, “格子投影法における外挿法の提案と計測精度評価,” 第9回 HASTIC 学術講演会, 2012. 3. 11.

(3) 岩佐貴史, 田中宏明, 樋口健, 石村康生, 神谷友裕, 秋田剛, 目黒在, 坂本啓, 中篠恭一, 岸本直子, 荻芳郎, 小木曾望, 泉田啓, “高精度大型宇宙構造システムの開発研究～高精度形状計測技術の開発～,” 第12回宇宙科学シンポジウム, 2012. 1. 4-5.

(4) 樋口健, 三輪武史, 岩井達也, 似鳥透, 岩佐貴史, 岸本直子, “小型凹面鏡の格子投影法による形状計測,” 第27回宇宙構造・材料シンポジウム, 2011. 12. 8.

(5) 樋口健, 三輪武史, 岩井達也, 似鳥透, 岩佐貴史, 岸本直子, “格子投影法外挿法による計測精度向上の試み,” 第27回宇宙構造・材料シンポジウム, 2011. 12. 8.

(6) 三輪武史, 樋口健, 藤垣元治, 塩川貴之, 岩井達也, 似鳥透, “格子投影法における外挿法の適用と面計測,” 第55回宇宙科学技術連合講演会, 2011. 12. 2.

(7) 川村寛志, 岩佐貴史, 樋口健, 岸本直子, 藤垣元治, 塩川貴之, “格子投影法を用いた薄膜に生じる皺の挙動計測,” 日本実験力学学会, 分科会合同ワークショップ, 2011. 12. 1.

(8) 川村寛志, 岩佐貴史, 樋口健, 岸本直子, 藤垣元治, 塩川貴之, “格子投影法を用いた膜面に生じる皺の減少過程の形状計測,” 日本航空宇宙学会中部関西合同講演会, 2011. 11. 25.

(9) H. Kawamura, T. Iwasa, K. Unemitsu, R. Sugiyama, N. Kishimoto, K. Higuchi, M. Fujigaki, T. Shiokawa, “Visualization on Formation Process of Wrinkling Phenomena on Thin Membranes using Grating Projection Method and Investigation on Their Nonlinear Mechanical Properties,” 28th International Symposium on Space Technology and Science, 5-12 June, 2011.

(10) 川村寛志, 岩佐貴史, 樋口 健, 岸本直子, 藤垣元治, 塩川貴之, “格子投影法による皺の生じた膜面の全視野形状計測,” 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会講演会, 2011. 3. 5.

(11) 采光啓太, 岩佐貴史, 川村寛志, 樋口 健, 岸本直子, 藤垣元治, 塩川貴之, “格子投影法による皺の生じた膜面形状の載荷経路依存性に関する実験的検証,” 第 26 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2010. 12. 10.

(12) Shiokawa, T., Shioji, Y., Fujigaki, M., Higuchi, K., Kishimoto, N., Morimoto Y., Masaya, A., “Shape Measurement of Deployable Parabolic Antenna for Satellite by Whole-space Tabulation Method,” International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (5th ISEM'10-Kyoto), 2010. 11. 7.

(13) 塩路義行, 樋口 健, 岸本直子, 藤垣元治, 塩川貴之, 森本吉春, “格子投影法によるメッシュ膜面の面外形状の計測,” 第 52 回構造強度に関する講演会, 2010. 7. 21.

(14) 塩川貴之, 藤垣元治, 梶谷明大, 樋口 健, 岸本直子, 塩路義行, 森本吉春, “全空間テーブル化手法による人工衛星のパラボラアンテナの形状計測,” 日本機械学会関西支部第 6 回 NCP フォーラム, 2010. 3. 29.

(15) 塩路義行, 渡邊隆司, 岸本直子, 樋口 健, 藤垣元治, 森本吉春, 塩川貴之, “メッシュ表面形状の格子投影法による計測,” 第 25 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2009. 12. 4.

(16) 塩路義行, 渡邊隆司, 岸本直子, 樋口 健, 藤垣元治, 森本吉春, 塩川貴之, “格子投影法による金属メッシュ面外形状の計測,” 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 2009. 9. 10.

(17) 塩川貴之, 藤垣元治, 梶谷明大, 森本吉春, “サンプリングモアレ法による動的形状計測手法への全空間テーブル化手法の適用,” 日本実験力学学会 2009 年度年次講演会, 2009. 8. 7.

(18) 渡邊隆司, 塩路義行, 岸本直子, 樋口 健, 森本吉春, 藤垣元治, 塩川貴之, 中籾恭一, “高伸縮膜によるリンクル抑制効果の解析と計測”, 第 51 回構造強度に関する講演会, 2009. 7. 23.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋口 健 (HIGUCHI KEN)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60165090

(2) 研究分担者

岩佐 貴史 (IWASA TAKASHI)

鳥取大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90450717

藤垣 元治 (FUJIGAKI MOTOHARU)

和歌山大学・システム工学科・准教授

研究者番号：40273875

岸本 直子 (KISHIMOTO NAOKO)

摂南大学・理工学部・講師

研究者番号：60450714

(3) 連携研究者

なし