

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02048

研究課題名(和文) トリム曲面接続の理論解析と計測点群データからの高品質トリム曲面の生成

研究課題名(英文) Theoretical Analysis on Trimmed Surface Connection and Generation of high-quality Trimmed Surface from Measured Point Data

研究代表者

三浦 憲二郎 (Miura, Kenjiro T.)

静岡大学・創造科学技術大学院・教授

研究者番号：50254066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：自動車の外装設計に用いられている自由曲面には滑らかで美しく高品質であることが要求される。実務でのニーズが強いにもかかわらずトリム曲面に関する理論的研究はほとんどなされていない。そこで、まず、トリム曲面を用いた自動車外装のリバースエンジニアリング手法として、最小二乗近似を行い、四辺形曲面をフィッティングし、それをトリムすることでトリム曲面を生成した。さらに、三角メッシュデータに対して接平面、および曲率連続性を満たすトリム曲面をフィッティングするための手法を研究・開発し、トリム曲面の接平面、および曲率連続化することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車の外装設計に用いられている自由曲面には滑らかで美しく高品質であることが要求される。実車のCADモデルには、4辺形パッチをパラメータ空間で切り抜いたトリム曲面がほぼ必ず使われている。しかしながら、実務でのニーズが強いにもかかわらずトリム曲面に関する理論的研究はほとんどなされていない。このためトリム曲面は現場のノウハウでモデリングされ、設計工学における形状モデリング研究が実務にまったく貢献できていない。本研究によりトリム曲面によるリバースエンジニアリングの可能性を見出すことができ、今後の提案技術の進展により高品質な外装を持つ車で製造可能となる。

研究成果の概要(英文)：Free-form surfaces used in automobile exterior design are required to be smooth, beautiful and of high quality. Although there is a strong need in practice, little theoretical research has been done on trimmed surfaces. So, first, as a reverse engineer for the exterior of automobiles using a trim curved surface. A least squares approximation was performed, a quadrilateral surface was fitted, and the trimmed surface was trimmed to generate a trimmed surface. Furthermore, we have researched and developed a method for fitting a tangent plane and a trimmed surface that satisfies the curvature continuity to the triangular mesh data, and succeeded in making the tangent plane of the trimmed surface and the curvature continuous.

研究分野：形状処理工学

キーワード：トリム曲面 デザイン 接平面連続性 曲率連続性 B-spline曲線 B-spline曲面 ガウス曲率 平均曲率 意匠

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

自動車の外装設計に用いられている自由曲面には滑らかで美しく高品質であることが要求される。実車の CAD モデルには、4 辺形パッチをパラメータ空間で切り抜いたトリム曲面がほぼ必ず使われている。しかしながら、実務でのニーズが強いにもかかわらずトリム曲面に関する理論的研究はほとんどなされていない。このためトリム曲面は現場のノウハウでモデリングされ、設計工学における形状モデリング研究が実務にまったく貢献できていない。

そこで、本研究ではまず、実車外装をレーザスキャナで計測し、それらの曲率分布等の特徴を分析することで実務に使えると判断するための「品質基準」を確立する。次に、トリム曲面を滑らかに接続する理論を構築し、申請者が開拓してきた美的曲線・曲面理論をトリム曲面に拡張して「品質基準」を満たすトリム曲面を生成する手法を確立する。これらの研究により、これまでにまったく実現されていない実務に利用できるトリム曲面による高品質リバースエンジニアリング手法を確立する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで理論研究がほとんどなされてこなかったトリム曲面の理論を数学者との協同により確立し、より広い範囲でトリム曲面が実務に使えるようにすることである。そのために、実車の外装をレーザスキャナで計測し、実務での使用に耐える自由曲面の品質に関する知見を得る。その知見に基づいてトリム曲面による高品質リバースエンジニアリング手法を確立する。

これまで学術的に十分な研究がされてこなかったトリム曲面を研究の主題として捉え、曲面間の接続の問題を解決しようとする試みは理論研究において独創的である。また、トリム曲面についての理論を確立することで、実務に使えるトリム曲面のモデリング技術の基盤を確立することは実務研究において独創的である。

意匠曲面のリバースエンジニアリングを自動的に行うことができれば、その応用は車だけに限られるものではなく、家電やその他の工業製品全般に適用できる。また、曲面の品質を定量化し「品質基準」が明らかにできれば、なぜ細分割曲面や T-spline 曲面の品質がものづくりに不十分であるか、が明らかになる。この知見を活かして、新しい細分割曲面の定式化や T-spline 曲面へのノット挿入の新しい規則を見いだせる可能性があり、形状モデリング、さらには設計工学を大きく進歩できる。

3. 研究の方法

(1) リバースエンジニアリングのための連続性を考慮したトリム曲面の生成

自動車外装の意匠デザイン開発では、測定データから自動的に CAD (Computer-Aided Design) データを生成するリバースエンジニアリング技術が注目されている。その実用化のためには測定データとして得られる三角メッシュデータに対して、適切なトリム曲面をフィッティングする必要がある。特に意匠形状では、フィッティングしたトリム曲面境界が滑らかに接続されることが機能的にも意匠的にも重要視される。本研究では、測定データとして与えられた三角メッシュデータに対して、境界での G1 連続及び G2 連続を考慮したトリム曲面のフィッティング手法を提案し、その詳細と結果について報告する。

トリム曲面のフィッティングは以下の手順で行う。

1. ラベル付きパラメータ化を用いてメッシュデータのパラメータ化を行う。
2. メッシュデータの領域をすべて覆うような B-spline 曲面をフィッティングする。
3. メッシュデータの境界からトリム境界を推定する。

トリム曲面境界の G1 連続化の手順を以下に示す。

図 1 はトリム曲面パッチからなるモデルであり隣接する境界は G0 連続で接続されているものとする。

1. 拡張したベース曲面から元の幾何形状を反映するためのサンプル点を抽出する(図 2)。
2. 境界条件を設定するための法線ベクトルとその位置座標をサンプリングする(図 3)。
3. サンプル点と境界条件を用いて制約付き B-spline 曲面フィッティングを行う(図 4)。
4. 最後に、元の境界曲線を用いて最フィッティングした曲面をトリムする(図 5)。

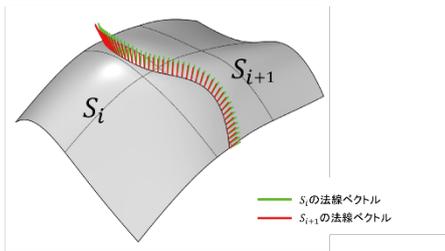


図 1 モデル

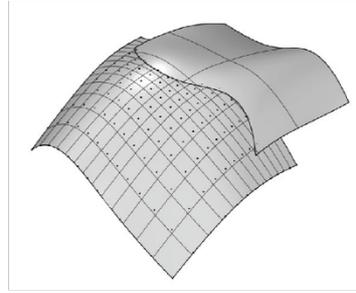


図 2 サンプル点の抽出

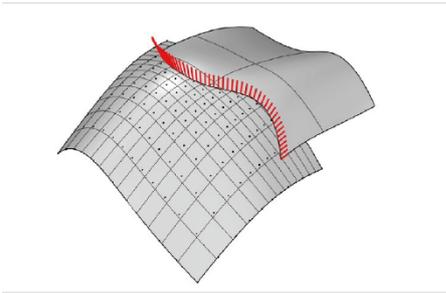


図 3 法線ベクトルと位置座標の
サンプリング

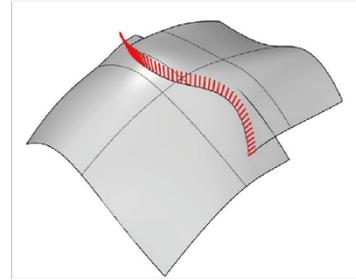


図 4 B-spline 曲面のフィッティング

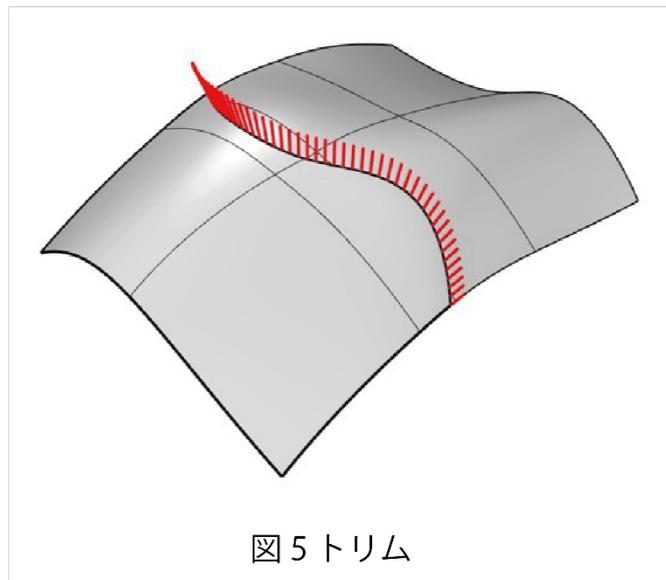


図 5 トリム

本研究では、与えられた三角形メッシュデータに対して、ラベル付き As-Rigid-As-Possible エネルギーを用いたトリム曲面フィッティングを行い、その後、ペナルティ法により得られた目的関数を用いて曲面境界の G1 連続化, G2 連続化を行うことで、連続性を考慮したトリム曲面をフィッティングする手法を提案した。また、提案手法を用いてテストデータに対してフィッティングを行い良好な結果を得ることができた。

(2) 画像処理を援用した三次元測定データの B-spline 曲面近似精度向上

本研究では、画像処理を援用することで三次元測定データから生成されたメッシュモデルを B-spline 曲面によって高精度に近似する手法を提案する。三次元測定結果から 3DCAD データを生成するリバースエンジニアリングという技術は、現在機械部品など簡単な形状のものに対して実用化がされている。しかし、自動車外装などの自由曲面に対しては未だに実用化がされていない。この理由として、自動車外装などの再現にはトリム曲面と呼ばれる、曲面の四辺形パッチを一度生成しその後不要な部分を取り除いて作られる複雑な曲面が用いられていることが挙げられる。

本研究の提案手法では、トリム曲面に用いられる B-spline 曲面によってメッシュモデルの近

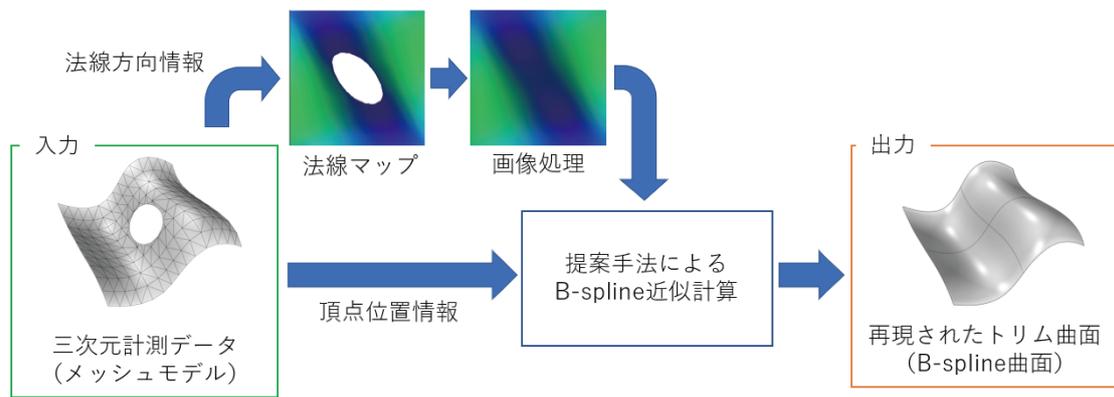


図 6 処理のフロー

似を高い精度で行うために、最初にメッシュモデルから得た法線方向情報を画像に変換し、それに画像処理を施すことによってメッシュモデルのみでは得られない情報の付加を行う。その後、生成された画像にフィルタなどを用いて曲面の解析を行い、その結果に応じた最適化計算を行うことで、従来よりも曲面の曲率変化を高精度に再現した B-spline 曲面の近似を行うことができた (図 6 参照)。

まず、曲面近似の対象となる 3D メッシュモデルの頂点位置や頂点接続などの情報を読み込み、ハーフエッジデータ構造に変換を行う。次に、各頂点に関して法線方向の計算を行う。そして、計算によって得られた法線方向の情報を RGB 画像情報に変換し、画像処理を行える形にする。この変換手法に関しては第 4 章において詳しく議論する。その後、作成された RGB 画像に対して画像処理を行い、法線方向情報の補間、平滑化を行う。メッシュモデルから得られる法線方向情報を補間、平滑化し、近似計算に用いることによって従来よりも滑らかな曲面の近似に寄与することが期待できる。最後に、処理された画像の情報とメッシュモデルから得られる頂点位置情報を合わせて、B-spline 曲面の近似計算を行う。

またここで曲面の情報を画像変換して処理を行う利点について説明する。まず、はじめに 3 次元形状よりも比較的容易に補間を行えることが挙げられる。3 次元形状上の情報を 2 次元に落とし込み、領域などの制限をかけることができるため、補間が行いやすいと考えられる。2 つ目に、画像処理のプログラムを用いて処理の有効性を検討することができることが挙げられる。画像に対するフィルタは 3 次元形状に対するそれよりも種類も手段も豊富であり、また OpenCV などのライブラリを用いれば容易に利用することができる。これにより様々な処理方法を検討することができるため、画像に変換することの利点であると考えられる。最後に、曲面上の点と UV マップ上の点の対応を自由に変えることができることが挙げられる。画像情報を変形させたとしても 3 次元上の点と UV マップ上の点が 1 対 1 で対応さえしていれば曲面を生成することができるため、エッジの方向や曲率の流れに応じて画像を変形させて生成する曲面を変化させることができる。

4. 研究成果

本研究では、トリム曲面について 1) リバースエンジニアリングのための連続性を考慮したトリム曲面の生成、および 2) 画像処理を援用した三次元測定データの B-spline 曲面近似精度向上、を主として行い、実務に有効な手法を確立することができた。

設計工学における形状モデリング研究が実務に貢献できることを明らかにしており、今後実務におけるリバースエンジニアリングの発展に貢献できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Miura Kenjiro T, Suzuki Sho, Usuki Shin, Gobithaasan R U	4. 巻 7
2. 論文標題 -curve: introduction of cusps to aesthetic curves	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Design and Engineering	6. 最初と最後の頁 155 ~ 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jcde/qwaa014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 USMAN Muhammad, ABBAS Muhammad, MIURA Kenjiro T.	4. 巻 14
2. 論文標題 Some engineering applications of new trigonometric cubic B?zier-like curves to free-form complex curve modeling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yahaya S. H., Salleh M. S., Miura Kenjiro T., Abdullah A., Warikh A. R. M, Jano Z.	4. 巻 1
2. 論文標題 An extensive analysis of frequency and transient responses in S and C-shaped gears	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Australian Journal of Mechanical Engineering	6. 最初と最後の頁 1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14484846.2020.1756182	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Maqsood Sidra, Abbas Muhammad, Hu Gang, Ramli Ahmad Lutfi Amri, Miura Kenjiro T.	4. 巻 2020
2. 論文標題 A Novel Generalization of Trigonometric B?zier Curve and Surface with Shape Parameters and Its Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematical Problems in Engineering	6. 最初と最後の頁 1 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2020/4036434	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Inoguchi Jun-ichi, Ziatdinov Rushan, Miura Kenjiro T.	4. 巻 8
2. 論文標題 A Note on Superspirals of Confluent Type	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 762 ~ 762
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/math8050762	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Dan, Gobithaasan R., Sekine Tadatoshi, Usuki Shin, Miura Kenjiro	4. 巻 18
2. 論文標題 Interpolation of Point Sequences with Extremum of Curvature by Log-aesthetic Curves with G2 continuity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 399 ~ 410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14733/cadaps.2021.399-410	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Fenhong, Hu Gang, Abbas Muhammad, Miura Kenjiro T.	4. 巻 8
2. 論文標題 The Generalized H-B?zier Model: Geometric Continuity Conditions and Applications to Curve and Surface Modeling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 924 ~ 924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/math8060924	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 BiBi Samia, Abbas Muhammad, Miura Kenjiro T., Misro Md Yushalify	4. 巻 8
2. 論文標題 Geometric Modeling of Novel Generalized Hybrid Trigonometric B?zier-Like Curve with Shape Parameters and Its Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 967 ~ 967
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/math8060967	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Majeed Abdul, Abbas Muhammad, Miura Kenjiro T., Kamran Mohsin, Nazir Tahir	4. 巻 8
2. 論文標題 Surface Modeling from 2D Contours with an Application to Craniofacial Fracture Construction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 1246 ~ 1246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/math8081246	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hu Gang, Li Huinan, Abbas Muhammad, Miura Kenjiro T., Wei Guoling	4. 巻 8
2. 論文標題 Explicit Continuity Conditions for G1 Connection of S- Curves and Surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 1359 ~ 1359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/math8081359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Wo Mei Seen, Gobithaasan R U, Miura Kenjiro T, Loy Kak Choon, Yasmeen Sadaf, Harun Fatimah Noor	4. 巻 8
2. 論文標題 Log-aesthetic curves and their relation to fluid flow patterns in terms of streamlines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Design and Engineering	6. 最初と最後の頁 55 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jcde/qwaa062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maqsood Sidra, Abbas Muhammad, Miura Kenjiro T., Majeed Abdul, Iqbal Azhar	4. 巻 2020
2. 論文標題 Geometric modeling and applications of generalized blended trigonometric B?zier curves with shape parameters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Difference Equations	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s13662-020-03001-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Majeed Abdul, Abbas Muhammad, Qayyum Faiza, Miura Kenjiro T., Misro Md Yushalify, Nazir Tahir	4. 巻 8
2. 論文標題 Geometric Modeling Using New Cubic Trigonometric B-Spline Functions with Shape Parameter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 2102 ~ 2102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/math8122102	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Yagi Kazumichi, Suzuki Sho, Usuki Shin, Miura Kenjiro	4. 巻 17
2. 論文標題 G1 Hermite Interpolating with Discrete Log-aesthetic Curves and Surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 607 ~ 620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14733/cadaps.2020.607-620	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Gobithaasan R., Yip S., Miura Kenjiro, Madhavan S.	4. 巻 17
2. 論文標題 Optimal Path Smoothing with Log-aesthetic Curves Based on Shortest Distance, Minimum Bending Energy or Curvature Variation Energy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Computer-Aided Design and Applications	6. 最初と最後の頁 639 ~ 658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14733/cadaps.2020.639-658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Dan Wang, R.U. Gobithaasan, Tadatoshi Sekine, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura
2. 発表標題 Interpolation of Point Sequences with Extremum of Curvature by Log-aesthetic Curves with G2 continuity
3. 学会等名 the 2020 International CAD Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Kenjiro T. Miura, R.U. Gobithaasan, Peter Salvi, Dang Wang, Tadatoshi Sekine, Shin Usuki, Jun-ichi Inoguchi, Kenji Kajiwara
2 . 発表標題 -Curves: Control for the Magnitude of Local Maximum Curvature
3 . 学会等名 Visual Computing 2020
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Kenjiro T. Miura
2 . 発表標題 Log-aesthetic Curves and Surfaces Based on Similarity Geometry,
3 . 学会等名 1st International Conference on Recent Advances in Mathematics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 R.U. Gobithaasan, S.W. Yip, Kenjiro T. Miura and S. Madhavan
2 . 発表標題 Optimal Path Smoothing with Log-aesthetic Curves Based on Shortest Distance, Minimum Bending Energy or Curvature Variation Energy
3 . 学会等名 the 2019 International CAD Conference and Exhibition (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Mei Seen Wo, R.U. Gobithaasan, Kenjiro Miura, Kak Choon Loy, Sadaf Yasmeen, F.N. Harun
2 . 発表標題 Log-aesthetic Curves and Its Relation to Fluid Flow Pattern In Terms of Streamlines
3 . 学会等名 ACCDDE2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 K.T. Miura, R.U. Gobithaasan, T. Sekine, S. Usuki
2. 発表標題 The Properties of Curve and its Discretization
3. 学会等名 ACCDDE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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	梶原 健司 (Kajiwara Kenji) (40268115)	九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・教授 (17102)	
研究分担者	井ノ口 順一 (Inoguchi Jun-ichi) (40309886)	筑波大学・数理物質系・教授 (12102)	
研究分担者	臼杵 深 (Usuki Shin) (60508191)	静岡大学・電子工学研究所・准教授 (13801)	

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		
マレーシア	University Malaysia Terengganu		
ハンガリー	ブダペスト工科大学		