

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11990

研究課題名(和文) データ駆動型物理法則CGアニメーションの発展と深化

研究課題名(英文) Development and Deepening Data-Driven Physics-based CG Animations

研究代表者

金井 崇 (Kanai, Takashi)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：60312261

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)：本研究の目的は、物理法則アニメーションについて、リアルタイムアニメーションを実現するためのデータ駆動型手法によるアプローチを確立することである。ここでは、物理法則アニメーションの中の研究トピックとして、脆性破壊、髪、人体変形の3つのアニメーションを取り上げ、その計算処理の中でボトルネックとなる処理を深層学習による処理に置き換える、というアプローチを採った。様々な実験を通じて、主に処理の高速化や効率化の点から提案手法の有効性を実証した。これらの研究により、データ駆動型物理法則CGアニメーションが、特にリアルタイムアニメーションの観点から極めて有効な手法になり得ることを確信している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械学習手法は近年長足の進歩を遂げており、最近では深層学習などの新しいツールが普及しつつある。本研究では、リアルタイムアニメーションが困難なトピックに対して、深層学習のような、他の分野で有効性が評価されている新しいツールを利用して、データ駆動型手法によるアプローチに取り組んだ。本研究の研究成果により、リアルタイムアニメーションを必要とする分野、例えば、ゲームやVRのような仮想空間において、人物や自然物のより写実的な表現をすることが可能となる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish a data-driven approach for real-time animation of physics-based animations. The approach taken here is to replace bottlenecks in the computational process with deep learning-based process. Through various experiments, we demonstrated the effectiveness of the proposed method, mainly in terms of processing speed and efficiency. Through these methods, we are convinced that data-driven physics-based CG animation can be an extremely effective method, especially in terms of real-time animation.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：物理法則アニメーション データ駆動法 深層学習 キャラクターアニメーション 髪アニメーション
脆性破壊アニメーション グラフアテンションネットワーク 敵対的生成ネットワーク

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。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年では、映画やテレビ、CM、ゲーム等において 3DCG(3次元コンピュータグラフィックス)による映像を利用することが一般的になっている。中でも、より現実に近い映像を得るために、物理法則にもとづくシミュレーション技術を利用してアニメーションを作成することが多くなっている。以下、ここではこれら一連の技術を、物理法則アニメーションと呼ぶ。例えば、物体が落下していく様子を表現するための剛体運動アニメーションや、水や煙の動きを表現するための流体アニメーションなどは、すでに商用の CG ソフトウェア上で実装され、利用できるようになっている。特に、ゲーム等の分野においては、物理的な挙動の計算を含めた、シーン全体の表示までの一連の計算をリアルタイムで処理することが必須条件である。そのような条件の下でも、ますます高品質・高精細な表現が必要とされている。

しかしながら、物理法則アニメーションにおいては、時間毎に微分方程式を解くことによりその挙動が計算されることが多く、一般的には計算時間がかかる。特にモデルの解像度が高くなるほど、その傾向は顕著に現れる。一方で、リアルタイム表示が求められるようなアプリケーションでは、時間的な制約から物理法則アニメーションの計算のために計算リソースを割くことができない場合が多い。したがって、より少ない計算リソースで、物理法則アニメーションを実行した結果と同等の効果を得るための方法が求められている。

機械学習の基本的なアプローチとしては、学習データをもとに分類モデルを作成し、未知のデータをクラスに分類する、ということが挙げられる。物理シミュレーションによって計算された挙動を観察すると、必ず、時間・空間的に異なる部分に、類似したパターンがあることが多いことがわかる。ただし、機械学習手法によって扱える範囲が異なるため、どのようなアプローチをとるかはそのアプリケーションの種別や使用目的によって異なる。

機械学習手法については長足の進歩を遂げており、最近では深層学習などの新しいツールが普及しつつある。深層学習は、主に音声や画像、自然言語を対象とする問題に対して研究が進み、その有効性が実証されている。CG の中では、画像処理以外の他の研究トピックでも深層学習が徐々に使われつつあるが、特に、物理法則アニメーションについては使用される対象が限られているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、物理法則アニメーションについて、リアルタイムアニメーションを実現するためのデータ駆動型手法によるアプローチを確立することである。このアプローチのことを、ここではデータ駆動型物理法則 CG アニメーションと呼ぶ。特に、深層学習を主なツールとして、物理法則アニメーションへの適用可能性を探り、さらにリアルタイムアニメーションの手法として利用できるかどうかを検討する。

本研究は、特にリアルタイムアニメーションが困難なトピックに対して、深層学習のような、他の分野で有効性が評価されている新しいツールを利用して、データ駆動型手法によるアプローチに取り組む点が、他の研究と比べて独自であると考えている。特に、次節以降で取りあげる3つの研究トピックについては、データ駆動型手法の適用という観点からは、我々のグループ以外にはほとんど扱われたことのないトピックであり、他に先駆けて研究を行っていると言える。

3. 研究の方法

ここでは、物理法則アニメーションの中の研究トピックとして、脆性破壊アニメーション、髪のアニメーション、人体の変形アニメーションの3つを主に取り上げる。基本的なアプローチとしては、対象とするアニメーションの計算処理の中でボトルネックとなる箇所を見つけ、その処理を、深層学習による処理に置き換えることで、処理の高速化や効率化を図る、というものである。そのとき、どのような処理を置き換えるか、どのような深層学習ネットワークを開発するかは対象のアニメーションによって異なる。また、考慮すべきこととしては、対象となるオブジェクトのサイズに依存しない、様々な動きに対応できる、など、なるべく汎用性を高める必要があることが挙げられる。さらに、単純にアニメーション時間だけでなく、学習でのデータの入手性や学習にかかる時間等を考慮して、ネットワークの設計をする必要がある。

4. 研究成果

4.1 多重解像度グラフネットワークによる非線形変形近似

本研究では、任意の頂点数を持つキャラクタの非線形変形を自動的に生成するための、グラフ学習に基づく強力な一般化手法を提案した。このような一般化されたネットワークを学習するためには、通常、相当数のポーズを持つ大規模なキャラクタデータセットが必要となる。本研究で

は、この課題を解決しつつ、ネットワークを一般化して現実的な変形近似を実現するための2つの重要な貢献を提示した。第一に、線形ベースの自動変形ステップの後、大まかに変形したメッシュに対しグラフを構築することで符号化した。次に、構築されたグラフを入力とし、各頂点のオフセット調整値をエンドツーエンドで出力する多重解像度グラフネットワークを設計した。この多重解像度グラフネットワークを処理することで、一般的な特徴をより良く抽出することができ、ネットワークの学習はもはや大量の学習データに大きく依存しないものとなる。実験の結果、提案手法は、初見のキャラクタやポーズの変形近似において、先行研究よりも優れた性能を達成した。

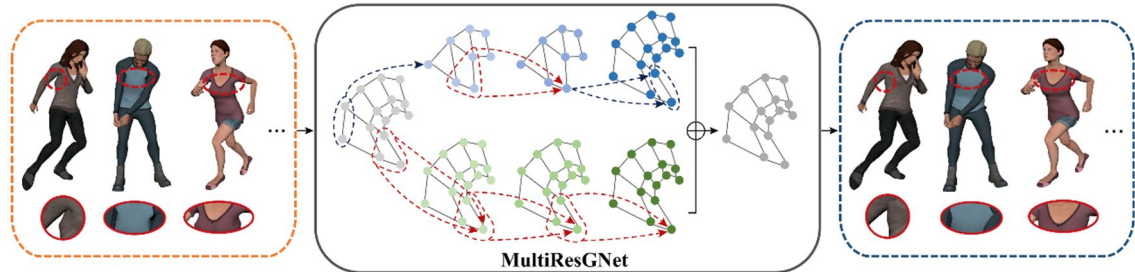


図1：本手法で提案したグラフレニングに基づく非線形変形近似ネットワーク。静止姿勢のキャラクタの集合が与えられると、まず、線形ベースの手法で大まかに変形させる。次に、これらのメッシュを3つの記述子で符号化し、本手法のネットワークに入力する。最後に、グローバルとローカルの両方の情報を処理することにより、リアルな非線形結果を得ることができる。本手法によりアニメーターの手作業を大幅に削減することができる。

4.2 写実的な髪の時間的に安定な敵対的生成ネットワークベースの高速なアニメーション

本研究では、写実的な髪アニメーションの敵対的生成ネットワーク(GAN)ベースのシェーディングモデルを提案した。ここでは教師なし生成ネットワークを拡張し、写実的な髪を高速にシェーディングすることを試みた。また、本研究のモデルは、従来のレンダリングアルゴリズムよりも高速で、他のニューラル画像変換手法よりもアーティファクトが少ないことを示した。主なアイデアは、Cycle-GAN 構造を拡張し、半透明の髪の外観の大部分を保存し、シーンのライトとの相互作用を正確に生成することである。ここでは、時間的コヒーレンスとハイライトの安定性を維持するために2つの制約を構築した。実験を通じて、従来の手法よりも優れており、計算効率が高いことを実証した。

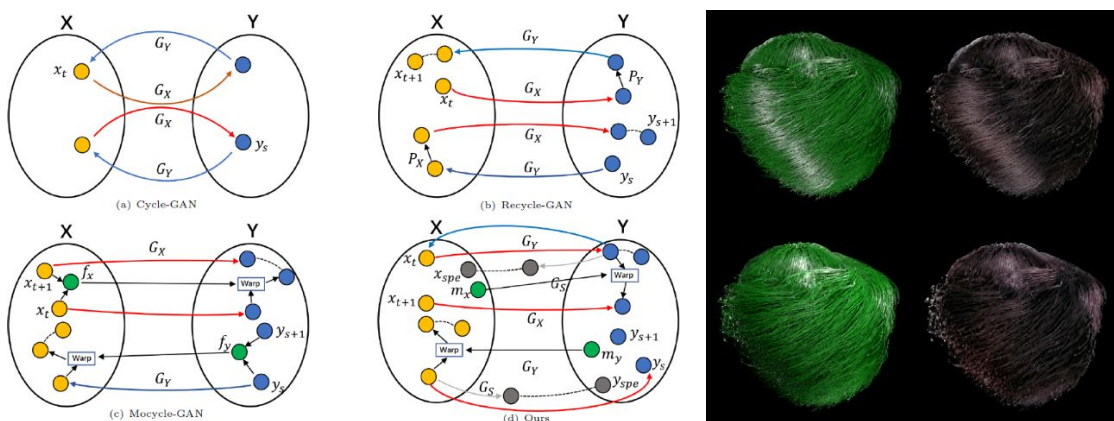


図2：左：既存研究のネットワークと、本手法によるネットワークの違い。本手法(d)では、オプティカルフローの代わりに、より正確な動きベクトルを用い、事前に学習したスペキュラジェネレータと、忠実な照明の見え方を保持するハイライト制約により次のフレームを予測している。右：本手法におけるハイライト制約を用いて、異なる照明に対し適用した結果。異なる照明条件下でも忠実にハイライトの出現を生成できる。

4.3 深層学習を用いた2D平面の脆性破壊形状生成

ガラスやコンクリートなどの平面形状の物体の脆性破壊は、現実世界でもよく見られる。剛体の破壊アニメーションは、物理指向のシミュレーションを用いることで、印象的な効果を得ることができる。しかし、現実的な破壊アニメーションを生成するために物理指向のシミュレーション手法を選択する場合、シミュレーションコストが高くなる傾向にある。一方、ゲームなどのリ

リアルタイムアプリケーションでは、衝突時にポロノイベースのセグメンテーションを適用した事前破壊パターンが一般的に用いられる。しかし、このようなパターンの形状は単調であり、複雑な骨折形状をリアルに表現することは難しい。そのため、リアルな特徴を実現しつつ、計算コストを抑えたトレードオフの手法が望まれる。

本研究では、汎用的な剛体シミュレーションライブラリに適用可能な、ポロノイベースの平面形状物体のセグメンテーションに代わる、条件付き敵対的生成ネットワーク技術をベースとした機械学習スキームを提案した。本手法における学習データセットは、境界要素法に基づく破壊シミュレーションによって生成した。ポロノイベースのセグメンテーションと比較して、より複雑な破壊形状を合理的な計算コストで現実的に生成することができることを、実験を通じて実証した。

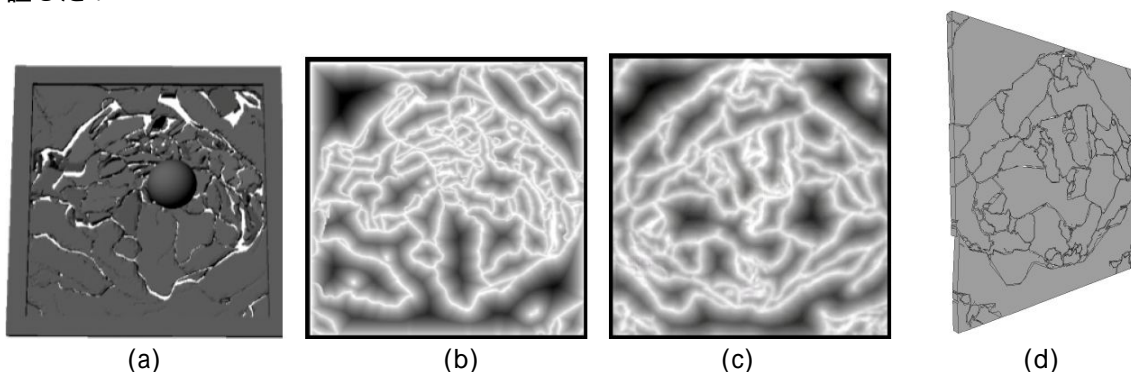


図3：本研究で提案された条件付き敵対的生成ネットワークによる破壊予測システムの結果比較。(a) BEMによるシミュレーション結果。(b) 真の破壊形状の結果を距離場で変換したもの。(c) 距離場を用いた我々の敵対的生成ネットワークによる予測結果。(d) 法線マップレンダリングにより3次元破壊形状を得た結果。

4.4 おわりに

本研究では、3つの物理法則アニメーションに関する研究トピックについて、深層学習による処理に置き換え、主に処理の高速化や効率化の点から有効性を実証した。以上の研究を通じて、データ駆動型物理法則CGアニメーションが、特にリアルタイムアニメーションの観点から極めて有効な手法になり得ることを確信している。

一方で、これらの手法を実用的なアプリケーションで用いるには、複数物体の協調的な動きに適用する必要があるものと考えている。すなわち、同じ性質もしくは異なる性質をもつ物体同士が、互いに影響を受けながら動作する状況において、シミュレーションによる計算をデータ駆動型手法に置き換えることができれば、計算コストの圧倒的な削減やアニメーション作成の効率化が期待できる。今後はそのような問題に対して本手法を適用することを考えていきたい。

最後に、本補助金によるご支援のもと研究が進められたことに深く感謝の意を表したい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tianxing Li, Rui Shi, Takashi Kanai	4. 巻 2020
2. 論文標題 DenseGATs: A Graph-Attention-Based Network for Nonlinear Character Deformation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games 2020	6. 最初と最後の頁 5:1-5:9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3384382.3384525	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 -
1. 著者名 Jules Morel, Alexandra Bac, Takashi Kanai	4. 巻 12142
2. 論文標題 High Accuracy Terrain Reconstruction from Point Clouds Using Implicit Deformable Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Computer Science (Proc. ICCS 2020 Part IV)	6. 最初と最後の頁 251-265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-50433-5_20	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 該当する
1. 著者名 Jiajun Zhang, Takashi Kanai	4. 巻 2020
2. 論文標題 Biological Modeling of Feathers by Morphogenesis Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 2020 International Conference on Cyberworlds	6. 最初と最後の頁 63-70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/cw49994.2020.00017	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 -
1. 著者名 Jules Morel, Alexandra Bac, Takashi Kanai	4. 巻 36
2. 論文標題 Segmentation of Unbalanced and In-homogeneous Point Clouds and Its Application to 3D Scanned Trees	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Visual Computer	6. 最初と最後の頁 2419-2431
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00371-020-01966-7	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 該当する

1. 著者名 Zhi Qiao, Takashi Kanai	4. 巻 2020
2. 論文標題 An Energy-Conserving Hair Shading Model Based on Neural Style Transfer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. Pacific Graphics 2020 Short Papers	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2312/pg.20201222	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 -

1. 著者名 Jules Morel, Alexandra Bac, Takashi Kanai	4. 巻 2020
2. 論文標題 Digital Terrain Model From UAV Photogrammetric Data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. STAG 2020: Smart Tools and Applications in Graphics	6. 最初と最後の頁 77-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2312/stag.20201242	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 該当する

1. 著者名 Zhi Qiao, Takashi Kanai	4. 巻 7
2. 論文標題 A GAN-based Temporally Stable Shading Model for Fast Animation of Photorealistic Hair	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Visual Media	6. 最初と最後の頁 127-138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41095-020-0201-9	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 Yuhang Huang, Takashi Kanai	4. 巻 2019
2. 論文標題 Brittle Fracture Prediction Method for Plane Shapes Using Conditional-GANs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 12th Asian Forum on Graphic Science	6. 最初と最後の頁 25:1-25:9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Naoyuki Hirasawa, Takashi Kanai, Ryoichi Ando	4. 巻 37
2. 論文標題 A Flux-Interpolated Advection Scheme for Fluid Simulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Visual Computer (Special issue for CGI 2021)	6. 最初と最後の頁 2607-2618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00371-021-02187-2	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 -

1. 著者名 黄 宇航, 金井 崇	4. 巻 50
2. 論文標題 深層学習ベース脆性破壊シミュレーションに向けて - 条件付きGAN による平面オブジェクトの破壊形状予測 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 画像電子学会誌	6. 最初と最後の頁 558-567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 高橋 初来, 金井 崇	4. 巻 50
2. 論文標題 Projective Dynamics におけるスモールステップ法の計算量削減	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 画像電子学会誌	6. 最初と最後の頁 568-579
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Tianxing Li, Rui Shi, Takashi Kanai	4. 巻 40
2. 論文標題 MultiResGNet: Approximating Nonlinear Deformation via Multi-Resolution Graphs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computer Graphics Forum (Eurographics 2021 Conference Issue)	6. 最初と最後の頁 537-548
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/cgf.142653	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 -

1. 著者名 Zen Luo, Tianxing Li, Takashi Kanai	4. 巻 2021
2. 論文標題 GarMatNet: A Learning-based Method for Predicting 3D Garment Mesh with Parameterized Materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. 14th ACM SIGGRAPH Conference on Motion, Interaction, and Games (MIG 2021)	6. 最初と最後の頁 4:1-4:10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3487983.3488294	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8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 渡邊 魁人, 金井 崇
2. 発表標題 点群用深層学習モデルを用いた高速なデータ駆動液体シミュレーション
3. 学会等名 Visual Computing 2020 ポスター
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金井 崇, モレル ジュル, バック アレクサンドラ
2. 発表標題 樹木・森林・地形モデリングのための LiDAR 点群処理
3. 学会等名 Visual Computing 2020 ポスター
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tianxing Li, Rui Shi, Takashi Kanai
2. 発表標題 DenseGATs: キャラクタの非線形変形のためのグラフアテンションネットワーク
3. 学会等名 Visual Computing 2020 ポスター
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jiajun Zhang, Takashi Kanai
2. 発表標題 Biological Modeling of Feather Based on Morphogenesis
3. 学会等名 情報処理学会 コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学第176回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武内 航, 川田 玄一, 齊藤 弘, 福田 啓, 金井 崇
2. 発表標題 深層学習を用いた光学式モーションキャプチャデータの平滑化
3. 学会等名 画像電子学会 ビジュアルコンピューティングワークショップ 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河内 友佑, 金井 崇
2. 発表標題 毛髪シミュレーションデータの時空間圧縮に関する研究
3. 学会等名 画像電子学会 ビジュアルコンピューティングワークショップ 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 下村 泰輝, 金井 崇
2. 発表標題 大規模液体アニメーションデータの動き補償予測に基づく時空間圧縮
3. 学会等名 映像表現・芸術科学フォーラム 2020
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李 天行, 石 睿, 金井 崇
2. 発表標題 MultiResGNet: Approximating Nonlinear Deformation via Multi-Resolution Graphs
3. 学会等名 Visual Computing 2021 招待講演 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 横山 ゆりか, 金井 崇, 舘 知宏, 三木 優彰	4. 発行年 2021年
2. 出版社 サイエンス社	5. 総ページ数 89
3. 書名 3D-CADで学ぶ図形科学入門 (電子版)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京大学 金井崇研究室 https://graphics.c.u-tokyo.ac.jp/
--

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

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
---------	---------