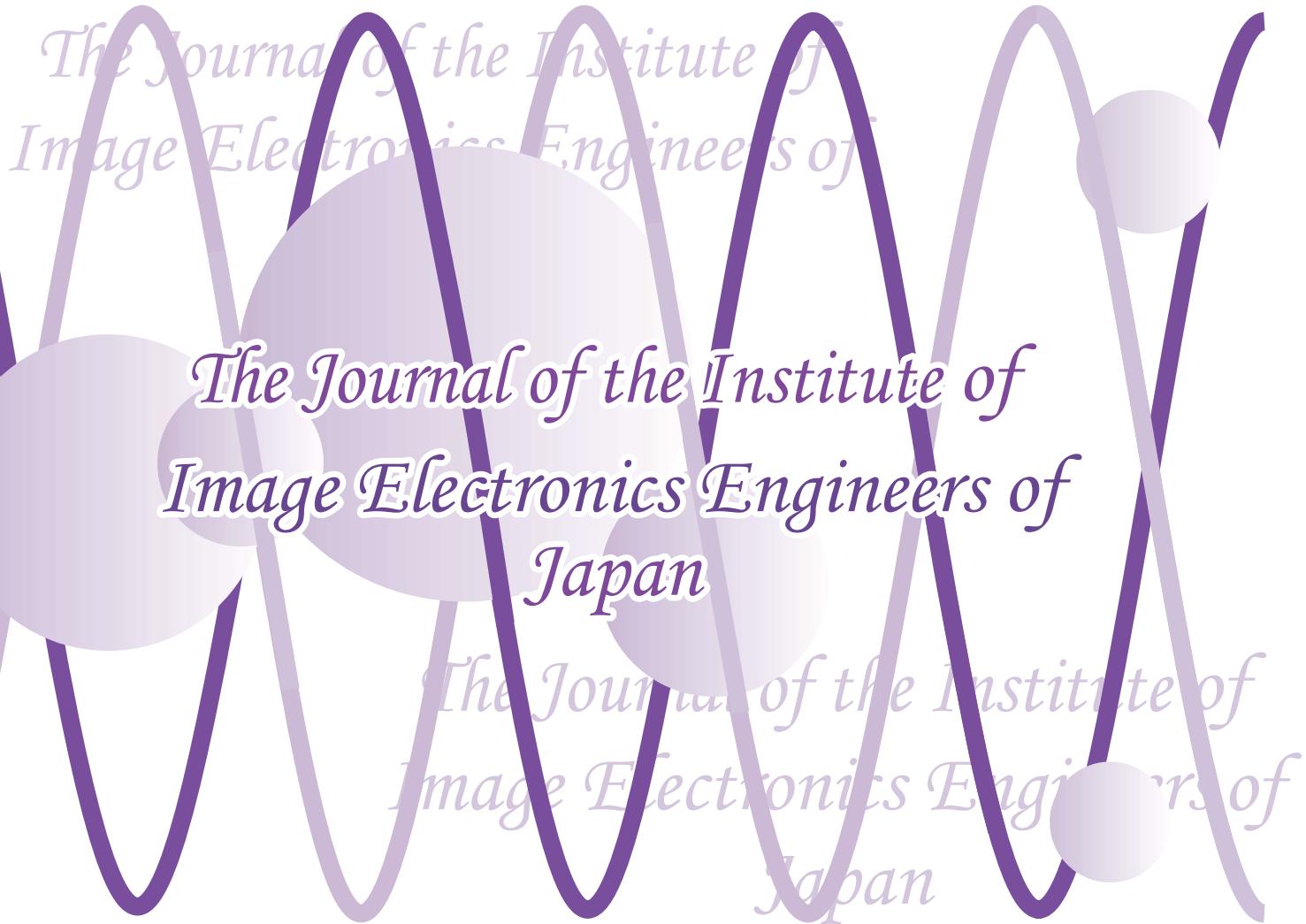


画像電子学会誌

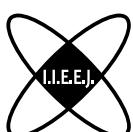


【ビジュアルコンピューティング論文特集】

- ◆【特集論文】cGANによる中空オブジェクトの脆性破壊形状生成
- ◆【特集論文】PolySlerp: 球面多角線形補間
- ◆【特集論文】写真を入力とする 2 次元アバター用衣装制作支援
- ◆【特集論文】Frame-Break : アナモルフォーシスを用いた裸眼立体映像の立体感の強化
- ◆【特集ショートペーパー】物体識別を目的とした物体のインタラクション領域の取得手法

【映像表現・芸術科学フォーラム論文小特集】

- ◆【特集ショートペーパー】メッシュのスペクトル処理を用いた位置ベースダイナミクスの高速化
- ◆【一般論文】筆跡のゆらぎに潜む筆者個性を活用した模倣筆跡の検出



一般社団法人

画像電子学会

Vol.54 No.4

2025

池上通信機株式会社
 株式会社 A B . d o
 科学技術振興機構
 公益財団法人画像情報教育振興協会
 桂川電機株式会社
 株式会社ゲネシスコンマース
 コニカミノルタ株式会社

Z A Z A 株式会社
 シリコンスタジオ株式会社
 大日本印刷株式会社
 東芝テック株式会社
 凸版印刷株式会社
 日本テレビ放送網株式会社
 日本電信電話株式会社

日本放送協会
 株式会社日立製作所
 富士フィルムビジネスソリューション株式会社
 古野電気株式会社
 三菱電機株式会社
 株式会社リコ一

編集委員会

(委員長) 内田 理
 (副委員長) 小林直樹, 竹島由里子, 石川雅浩.
 (編集顧問) 安田靖彦, 富永英義, 小宮一三, 小野文孝,
 羽鳥好律, 松本充司, 加藤茂夫, 田中 清,
 児玉 明.
 (編集理事) 石川雅浩, 新田高庸, 向井智彦, 今給黎 隆
 (編集幹事) 河村尚登, 森谷友昭, 山田雄一郎.
 (編集・
 査読委員) 荒井良徳, 池田充郎, 井尻 敬, 石川知一,
 五十嵐悠紀, 上平員丈, 大井 翔, 大木眞琴,
 木村俊一, 久下哲郎, 倉掛正治, 小池崇文,
 櫻井快勢, 佐藤甲癸, 佐藤周平, 白川真一,
 新谷幹夫, 関野雅則, 田中賢一, 田中 清,
 N.P.チャンドラシリ, プレーマチャンドラ・チントカ,
 豊浦正広, 長谷川まどか, 濱本和彦, 藤澤 誠,
 藤代一成, 牧田孝嗣, 吉田典正, 吉川 浩,
 Chee Seng CHAN,
 Paramesran RAVEENDRAN, KokSheik WONG.

(査読委員) 荒川賢一, 荒木昭一, 有川智彦, 伊藤貴之,
 五十嵐悠紀, 岩切宗利, 岩橋政宏, 大澤秀史,
 尾上孝雄, 金井 崇, 金子俊一, 金森由博, 金子 格,
 金田和文, 北郷正輝, 勝間ひでとし, 栗原恒弥,
 黒沢俊晴, 洪 博哲, 小館亮之, 駒形英樹,
 小町祐史, 今間俊博, 斎藤隆文, 斎藤 豪,
 斎藤文彦, 佐藤真知子, 篠原克幸, 島村 潤,
 下馬場 朋祿, 白井啓一郎, 杉崎栄嗣, 濱崎 薫,
 濱政孝義, 高島洋一, 高野邦彦, 田中芳樹,
 高橋時市郎, 谷口行信, 田村 徹, 辻 宏行,
 鉄谷信二, 中村康弘, 納富一宏, 包 躍,
 林 正樹, 福江潔也, 堀田裕弘, 本宮隆広,
 茅 曜陽, 松木 真, 松田浩一, 三田雄志,
 三ツ峰秀樹, 六浦光一, 森島繁生, 柳原政弘,
 藤下浩子, 山口隆二, 山崎龍次, Hernan AGUIRRE,
 Yoong Choon CHANG, Robin Bing-Yu CHEN,
 Mochamad HARIADI, Pizzanu KANONGCHAIYOS,
 Teck Chaw LING, Keat Keong PHANG,
 Nordin BIN RAMLI.

(事務担当) 大嶽英宗, 浮ヶ谷 修, 福島理恵子, 本田京子.

入会のご案内

入会ご希望の方は下記ご参照の上, 学会ホームページよりお申込頂くか, 事務局にその旨ご連絡ください。

○会員の種別

正会員: 本会の目的に賛同する個人
 学生会員: 本会の目的に賛同する学生
 賛助会員: 本学会を援助する個人または法人
 特殊会員: 本学会の目的に賛同する個人以外の図書室, 研究室など

○入会金および年会費

入会金: 正会員 1,000 円 学生会員 500 円
 年会費: 正会員 10,000 円
 学生会員 3,000 円
 賛助会員 50,000 円 (1 口)
 特殊会員 12,500 円

○ご連絡先

〒116-0002 東京都荒川区荒川 3-35-4
 ライオンズマンション三河島第二 101 号
 TEL (03)5615-2893 FAX (03) 5615-2894
 E-mail: hensyu@iiej.org (編集)
 kikaku@iiej.org (研究会・会員情報)
 hyoujun@iiej.org (テストチャート)
<http://www.iiej.org/>
<http://www.facebook.com/IIEEJ>

画像電子学会誌

第54巻 第4号 通巻274号 (2025年10月)

目 次

随 想

373 リアルを超えて心に寄り添う画像メディアの未来 山本 奏

ビジュアルコンピューティング論文特集/映像表現・芸術科学フォーラム論文小特集号

374 ビジュアルコンピューティング論文特集/映像表現・芸術科学 フォーラム論文小特集に寄せて 金井 崇

ビジュアルコンピューティング論文特集

論 文

375 cGANによる中空オブジェクトの脆性破壊形状生成 青木悠真, 床井浩平

384 PolySerp: 球面多角線形補間 中山雅紀, 藤代一成

395 写真を入力とする2次元アバター用衣装制作支援 坂本夏海, 五十嵐 悠紀

405 Frame-Break: アナモルフォーシスを用いた裸眼立体映像の立体感の強化 徳永恵太, 藤代一成

ショートペーパー

412 物体識別を目的とした物体のインタラクション領域の取得手法 福田徹平, 石井雅樹, 堂坂浩二

映像表現・芸術科学フォーラム論文小特集

ショートペーパー

417 メッシュのスペクトル処理を用いた位置ベースダイナミクスの高速化 飛鳥井翠, 菊池知世, 金井 崇

一般論文

422 筆跡のゆらぎに潜む筆者個性を活用した模倣筆跡の検出 古川 諒, 岩下晋治, 常盤公徳, 福江潔也, 長 幸平

報 告

435 第9回アレキサンダー・ペイン賞 授賞報告 ペイン賞選定委員会

438 2025年度 第53回 画像電子学会年次大会報告 岩崎 慶

グループ紹介

441 拓殖大学 藤堂研究室 藤堂 英樹

会 告・ニュース

443 理事会だより

446 「会員用Web」への登録実施のお願いおよび、会費の口座振替特典終了のお知らせ

447 画像電子学会研究会等予定

448 高臨場感ディスプレイフォーラム2025(画像電子学会第314回研究会)
～心を動かす・空間をつなぐ高臨場感コミュニケーション技術～

450 画像電子学会 第315回研究会 In 北海道 発表募集

452 ビジュアルコンピューティング論文募集

453 論文投稿の手引き

457

論文賞候補論文推薦のお願い・論文賞表彰規定

459

西田賞候補論文推薦のお願い・西田賞表彰規定

461

アレキサンダー・ペイン賞候補推薦募集

463

画像電子技術賞候補の推薦のお願い

466

フェロー候補推薦募集

468

代議員候補推薦のお願い

469

日本画像学会誌・日本写真学会誌・日本印刷学会誌目次

474

会 報

編集後記

The Journal of
the Institute of Image Electronics Engineers of Japan
Vo1.54 No.4 October 2025
CONTENTS

Foreword

373 Beyond Reality, Touching Hearts: The Future of Imaging Media Susumu YAMAMOTO

Special Issue on Visual Computing / Expressive Japan 2025

374 Introduction to the Special Issue on Visual Computing / Expressive Japan 2025 Takashi KANAI

Special Issue on Visual Computing

Contributed Papers

375 Brittle Fracture Shape Generation of Hollow Objects by cGAN Yuma AOKI, Kohe TOKOI

384 PolySlerp: Spherical Polygon Linear Interpolation Masanori NAKAYAMA, Issei FUJISHIRO

395 2D Avatar Costume Production Using Photographs Natsumi SAKAMOTO, Yuki IGARASHI

405 Frame-Break: Enhancing the Stereoscopic Effect of Anamorphosis-Based Naked-Eye 3D Images Keita TOKUNAGA, Issei FUJISHIRO

Short Paper

412 A Method for Acquiring Interaction Regions of Objects for Object Identification Teppei FUKUDA, Masaki ISHII, Kohji DOHSAKA

Special Issue on Expressive Japan 2025

Short Paper

417 Spectral Mesh Processing for Accelerating Position-Based Dynamics Midori ASUKAI, Tomoyo KIKUCHI, Takashi KANAI

Regular Section

Contributed Paper

422 Handwriting Forgery Detection by Utilizing Writer Individuality Hidden in Within-Writer Variation Ryoh FURUKAWA, Shinji IWASHITA, Kiminori TOKIWA, Kiyonari FUKUE, Kohei CHO

Reports

435 The Report of the Ninth Ceremony of Alexander Bain Award Alexander Bain Award Committee

438 The Report of IIEEJ Media Computing Conference 2025 Kei IWASAKI

Research Group Introduction

441 Todo Lab., Takushoku University Hideki TODO

リアルを超えて心に寄り添う画像メディアの未来

山本 奏 (副会長, NTT 株式会社)

Beyond Reality, Touching Hearts: The Future of Imaging Media

Susumu YAMAMOTO (Vice President of IIEEJ, NTT)



現在、生成 AI や大規模言語モデル (LLM) の話題を聞かない日はないほど、AI 技術が急速に発展し、画像生成 AI やマルチモーダル AI の登場によって画像分野も新たな局面を迎えてます。振り返れば、画像に関する研究では、かつては画像や映像の符号化・圧縮技術を中心とした領域が花形で、本学会も元をたどれば 1972 年に画像電送・ファクシミリを主たるターゲットとして発足したのが始まりでした。映像の符号化伝送技術は、さらに多地点間の臨場感の高いコミュニケーションの実現技術へと発展し、遠隔会議や医療、教育、ライブビューイングなどの分野での活用につながってきました。こうした技術は映像に音響や振動・触覚などのモーダルまで拡大した高臨場感通信技術に進展しています。手前味噌ではありますが、私の所属する NTT でも、大阪・関西万博で「動的 3D 空間伝送再現技術」や「触覚振動音場提示技術」を用いたライブ伝送を実証して好評を博しています。また、冒頭に述べたように AI と画像技術は融合し、画像を生成・理解する AI 技術や、当初は言語を中心に発展してきた LLM が画像と統合した VLM (Vision Language Model)、さらには音声やセンサデータも含めたマルチモーダルなモデルなど、さまざまなメディアを横断する大規模モデル、これらの AI が世界を再現する「ワールドモデル」へと進化し、社会や産業のあらゆる場面で新たな価値を生み出す研究開発が進められています。

では、これから画像を含めたメディア技術は一体どこへ向かうのでしょうか。2 年前の本誌への寄稿では「リアルとサイバーをつなぐメディア技術」によって「意識することなく直感的にサイバーとつながる」世界がやってくるだろう、と述べましたが、これには大きく二つの方向性があると考えています。

一つは「リアルを書き換える」方向です。リアル世界を書き換えるなんて（文字通り）「非現実な」と思われるかもしれません、実は音響・聴覚の分野では既にリアルの体験を変容させる技術が実現されつつあります。厳密に言えば物理現象からなる「フィジカル」は書き換えられませんが、人が感じる「リアル」の体験であれば書き換えることができるのです。例えば、ノイズキャンセリングヘッドホンで使われるような能動騒音制御 (ANC) 技術では、伝わってくる騒音の音波に逆相の音波を当てるによって騒音を打ち消す制御を行っています。従来は耳元の小さな領域で音を打ち消すだけでしたが、空間的に広い領域で騒音を抑制する技術の研究も進んでいます。これが可能になるのは、超低遅延の音響信号処理を音が届くまでに実施可能となってきたからで、この技術をさらに活用し、音速を飛び越えた音響処理で音の聴こえ方を変化させる研究も始まっています。光速を超える信号処理は不可能なため、音響と同様なリアルの書き換えを画像・視覚の世界に直接応用できるわけではありませんが、リアルの視覚体験の変容に向け、XR グラス技術や、実在しない虚像を映し出すホログラフィ技術の進歩が期待されるところです。

もう一つは「人の心に寄り添う」方向です。画像メディアは、これまでの物理現象を忠実に伝える領域から、「どのように感じるか」、「どのように心に響くか」といった、より主観的な体験の領域へと進化しつつあります。脳内では、脳が視覚情報を予測しながら処理する「予測符号化」により、私たちは物体を決して物理現象のありのままには認識していないという仮説もあります。錯覚や錯覚を活用した空間認識の拡張や、感情を想起させる画像やシーンの生成など、「感じ方」に寄り添うアプローチが、これまで以上に進化するのではないかと考えます。さらに、筋電や脳波などの生体信号を活用したインターフェースが画像メディアと融合することで、個人の状態に応じた新たなコミュニケーション体験の創出につながることも期待されます。

こうした技術によって、現実と仮想の境界を動的に編集・再構成し、個人の心や社会の本質に最適化された体験世界を感じさせることができたなら、と夢は広がります。実用に至るにはまだまだ時間のかかる分野も多いでしょうが、「研究」とは二歩三歩先の未来を創造してこそその営みです。若い研究者の皆さんには、10 年先と言わず 20 年 30 年先をも想像して、ぜひ果敢に挑戦していっていただきたいと思います。

最後に、ふつつかながら本学会の副会長のお役目を再任することとなりました。これまでの 2 年間で貢献できたことはわざわざではありますが、今後も学会の円滑な運営と皆様の研究発展に微力ながら尽力してまいります。どうぞよろしくお願い申し上げます。

ビジュアルコンピューティング論文特集・ 映像表現・芸術科学フォーラム論文小特集に寄せて

ゲスト編集委員長

ビジュアルコンピューティング研究会 前委員長 金井 崇

2025年度の「ビジュアルコンピューティング（VC）論文特集号」並びに「映像表現・芸術科学フォーラム論文小特集号」をお届けします。VC特集は、コンピュータグラフィックス、コンピュータビジョン、画像処理、可視化などを中心とした視覚計算融合領域に関する研究成果を対象に、論文の募集・査読・編集・出版を行うもので、本号で第31回を迎えます。今回の「映像表現・芸術科学フォーラム論文特集」は、2025年3月に開催された「映像表現・芸術科学フォーラム 2025」で発表された論文のうち学会誌論文として投稿されたものを査読し編集・出版するものであり、本論文特集の担当は、三学会（画像電子学会、映像情報メディア学会、芸術科学会）の持ち回りで、今年は画像電子学会が担当すること、両者の投稿時期がほぼ重なっており両特集とも本学会VC研究会のメンバーが中心となって査読・編集を担当することから、本年度は同一号に両特集を併せて掲載する形式といたしました。

本年度は、VC特集に11件、フォーラム特集に3件、計14件の投稿をいただきました。昨年度の9件、一昨年度の12件と比べて増加しており、学会が集中し年度末でもある多忙な時期にもかかわらずご投稿くださった皆様に、心より感謝申し上げます。厳正な査読の結果、VC特集号として一般論文4件、ショートペーパー1件、フォーラム小特集号としてショートペーパー1件を採択いたしました。採択論文の分野は、物理シミュレーション、モデリング、アニメーション、デザイン・制作支援、立体映像、物体識別・インタラクションなど多岐にわたり、いずれも興味深い研究成果が揃いました。一方で、惜しくも採択に至らなかった論文にも優れた要素が多く含まれておりました。査読時のコメントを参考に研究をさらに発展させて、ぜひ再投稿いただければ幸いです。

VC論文特集号は、日本国内の論文誌としては数少ない、ビジュアルコンピューティング技術に特化した特集を毎年継続して刊行しています。査読には国内の第一線で活躍する研究者があり、掲載論文の品質を高い水準で保証しています。また、博士課程の学生による学位論文投稿スケジュールにも配慮して、出版時期を設定しています。一方、フォーラム特集については、映像表現・芸術科学フォーラムの口頭発表時に提出される4ページの論文が、画像電子学会誌のショートペーパーとしてちょうど適した長さであることから、投稿しやすい形式となっております。さらに、両特集に掲載された論文は当然のことながら「西田賞」および画像電子学会論文賞の選定対象となります。特に西田賞は、過去2年間に画像電子学会誌に掲載されたビジュアルコンピューティング関連論文の中から隔年で選出される表彰であり、特集号への掲載が受賞への好機会であるといえます。このように、本特集号への投稿には多くの意義とメリットがあります。今後もぜひ積極的にご投稿いただければ幸いです。

VC研究会の活動としては、他に「ビジュアルコンピューティングワークショップ（VCWS）」の開催も挙げられます。これは1泊2日の合宿形式で、活発な議論を通じて研究交流を深める場です。本年は12月8~9日に北海道・札幌定山渓にて開催を予定しております。対面で皆さまとお会いし、ビジュアルコンピューティングの未来について議論できることを楽しみにしております。

最後になりましたが、本特集号の出版にあたり、ゲスト編集幹事、編集理事・編集委員の先生方には、査読、校正、編集などにおいて多大なるご尽力を賜りました。また、学会事務局の皆様にも、論文募集から出版に至るすべての段階で献身的なご支援をいただきました。この場をお借りして、厚く御礼申し上げます。

ゲスト編集委員長：金井 崇（東京大学）

ゲスト編集幹事：石川 知一（東洋大学）、古屋 貴彦（山梨大学）、謝 浩然（北陸先端科学技術大学院大学）

cGAN による中空オブジェクトの脆性破壊形状生成

青木 悠 真[†] 床井 浩 平^{††}(正会員)

[†]和歌山大学システム工学研究科, ^{††}和歌山大学システム工学部

Brittle Fracture Shape Generation of Hollow Objects by cGAN

Yuma AOKI[†], Kohe TOKOI^{††}(Member)

[†] Graduate School of System Engineering, Wakayama University,
^{††} Faculty of System Engineering, Wakayama University

〈あらまし〉 本論文では、ビデオゲームなどのリアルタイム性が求められる環境において、物理シミュレーションに近い破壊形状を高速に生成する、cGAN を用いた中空オブジェクトの脆性破壊形状生成手法を提案する。提案手法は対象形状の法線情報と物理ベースの破壊シミュレーションから得た亀裂パターンを、対象形状をパラメータ化した2次元空間にそれぞれマッピングし、それらをデータセットとして cGAN の訓練に用いることにより、破片形状を生成する。この手法は、先行研究が平面オブジェクトのみを対象にしているのに対して、立体的な中空オブジェクトに適用範囲を拡張したものである。提案手法の有効性を検証するため、pix2pix と MSGAN の2つの cGAN アルゴリズムを用いて実験を行い、生成結果の視覚評価と密度分布マップによる定量評価を実施した。その結果、両手法とも物理シミュレーションに近い破片形状を生成可能であることが示された。特に MSGAN では、生成結果の多様性が向上することが確認された。また計算時間についても、提案手法が物理シミュレーションと比較して大幅な処理時間短縮を達成し、軽量な代替手段として有効であることが示された。

キーワード：破壊シミュレーション、脆性破壊、深層学習、cGAN、パラメータ化

<Summary> In this paper, we propose a method for generating brittle fracture shapes for hollow objects using cGAN to quickly generate fracture shapes similar to those from physics-based simulations in real-time environments, such as video games. The proposed method maps normal information of the target shape and crack pattern obtained from a physics-based fragmentation simulation onto a parameterized 2D representation of the shape, subsequently using these as datasets to train cGAN and generate fragment shapes. This method extends applicability to three-dimensional hollow objects, whereas previous studies focused only on planar objects. To evaluate its effectiveness, we conducted experiments using two cGAN algorithms, pix2pix and MSGAN, and assessed the generated results through visual evaluation of the generation results and quantitative evaluation using density distribution maps. The results confirmed that both methods could generate fragment shapes similar to those obtained by physical simulations. In particular, it was confirmed that the diversity of the generation results was improved with MSGAN. In terms of calculation time, the proposed method also achieved a significant reduction in processing time compared to physics simulations, demonstrating its effectiveness as a lightweight alternative.

Keywords: fragmentation simulation, brittle fracture shape, deep learning, cGAN, parameterization

1. はじめに

近年のコンピュータ技術の進歩により、ハードウェアの性能向上と新技術の開発が進み、現実と見紛うほどの高品質なグラフィック表現が可能になっている。これによりゲーム業界をはじめとするエンターテインメント分野では、美麗でリアルなコンピュータグラフィックス(CG)を特徴とする作品

が増加している。それに伴い、ユーザーはより高精細で没入感のある映像表現を求めるようになっており、リアルなCGは単なる技術的要素を超えて、体験価値を向上させる重要な要素として注目されている。

特に、臨場感を重視するビデオゲームでは、CGの品質が没入感やプレイ体験に直結する。こうした臨場感を高める技術の一つに“オブジェクトの破壊表現”がある。これはオブ

ジェクトが壊れる瞬間をリアルに再現し、プレイヤーに物理的な影響を感じさせることで、より没入感のあるインタラクションを生み出す。しかし、物理ベースの破壊シミュレーションは計算コストが高く、リアルタイム処理が求められるゲームでは非現実的である。

このため、一般的には事前に破壊されるオブジェクトを分割しておき、破壊後にオブジェクトや関連するエフェクトを切り替える手法が採用されている。しかし、この方法は実行時のリアルタイム性は確保できるものの、破片形状が固定されているため、同じオブジェクトを異なる状況で破壊しても破片形状や破片の挙動が変化せず、プレイヤーに違和感を与える場合がある。また、破片形状の生成にボロノイ分割などの幾何学的な手法を用いた場合は、現実とは異なる不自然な形状が生成されることもある。

そこで本研究では、深層学習を用いて、物理ベースの破壊シミュレーションに類似した自然な破片形状を高速に生成する手法を提案する。この手法は平面形状を対象にしていた先行研究^{1),2)}の手法を中空の立体形状が取り扱えるように拡張し、被衝突オブジェクトの破片を物理ベースのシミュレーション結果に近い形状に分割する。これは実行時に厳密な物理シミュレーションを行わないため、リアルな破片形状を低い計算コストで生成することが可能である。

2. 関連研究

2.1 物理ベースの破壊シミュレーション

物理ベースの破壊シミュレーションは現実の物理現象に基づくため、リアルな破片形状が生成できる。反面、亀裂の進展をリアルタイムにシミュレーションするにはフレームごとに物理演算が必要となり、計算コストが非常に高い。そのため、これをそのままリアルタイム性が求められるゲームやインタラクティブアプリケーションに応用するのは難しい。

そこで Pfaff ら³⁾は Adaptive Meshing を用いた手法を提案した。この手法は亀裂の発生や進展が予測される領域のメッシュ（頂点とポリゴンからなる形状データ）を細分化し、ひずみや塑性変形を精密に計算することで、リアルな亀裂の進展を再現する。また、応力が低い領域や亀裂が進展しない領域ではメッシュを粗く保つことにより、リアリティを維持しながら計算コストを削減している。

しかし、この手法でも広範囲にわたる亀裂進展を伴う複雑なシーンでは、依然として計算コストが高い。特に、ひずみ場や塑性変形の計算を精密に行おうとするとシミュレーションに数分から数時間を要し、リアルタイム処理への応用は困難である。

この手法は ARCSim⁴⁾に実装されており、本研究では破壊形状の学習データの作成にこれを用いる。

2.2 深層学習による脆性破壊形状生成

物理ベースの破壊シミュレーションは計算コストが非常に高いため、黄ら¹⁾は深層学習の一種である条件付き敵対的生成ネットワーク (Conditional Generative Adversarial Network, cGAN)⁵⁾を、球が平面オブジェクトに衝突して破壊する際の脆性破壊形状の予測に用いた。この手法は画像を入力条件として用いる Image-to-Image Translation (I2I) 手法を採用し、代表的なアルゴリズムである pix2pix⁶⁾を使用している。この研究では cGAN を用いて破片形状を学習し、物理ベースの破壊シミュレーションに近い破片形状を現実的な処理時間で生成できることを示した。

具体的には、物理ベースの破壊シミュレーションを事前に行い、得られた破壊分割パターンマップ (Fracture Segmentation Pattern Map, FSPM) と力条件マップ (Force Condition Map, FCM) の画像ペアをデータセットとして学習する。FCM は衝突オブジェクトの物理条件を画像化したものであり、衝突前の 30 フレームの軌跡を積算して作成する。

この手法において、黄らは任意の 3 次元形状への対応が課題であると指摘している。平面はゲームのシーンで多用される基本形状だが、それ以上に曲面を伴う立体形状の取り扱いは重要である。そのため、平面に限定されない破壊形状生成手法が求められる。

また青木ら²⁾は、黄らの手法を拡張し、衝突オブジェクトの速度や質量の差異に対応できるようにした。この手法では、破壊対象の平面に対応する格子状のメッシュ上で、破壊シミュレーションと同じ条件で球を衝突させる。そしてバネ質点モデルに基づき、球の運動量が 0 になるまでのメッシュの各格子点の変位を求める。この変位を青から赤の疑似カラーで表現し、FCM に用いる。また、衝突位置を固定したときにモード崩壊により速度と質量の変化が FSPM に反映されないことを防ぐため、pix2pix に代えて MSGAN⁹⁾を採用している。しかし、この手法も対象を平面に限定している。

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

提案手法は平面オブジェクトを対象としていた深層学習による破壊形状の生成手法^{1),2)}を、位相が球体の中空立体形状に適用できるよう拡張したものである。具体的には、まず 3D オブジェクトを用いて物理ベースの破壊シミュレーションを行い、立体表面に生じる亀裂パターンを取得する。次に、この 3D オブジェクトをパラメータ化して 2 次元のメッシュを作成し、そこへ対象形状の法線情報と、シミュレーションで得られた 3 次元の亀裂パターンをマッピングする。これらをそれぞれ入力画像と正解画像としてデータセットを作成し、cGAN の学習に用いる。このように、パラメータ化により三次元の情報を二次元空間に落とし込むことで、対象が 3D オブジェクトであっても cGAN での学習を可能としたことが、先行研究に対する本研究の主要な貢献である。

なお、提案手法は2次元の破壊形状の生成手法を拡張したものであるため、対象となるオブジェクトは中空とする。したがってオブジェクト内部に進展する亀裂は考慮しない。

3.2 前処理

cGANの学習データセットに用いる、入力画像と正解画像を作成する。

3.2.1 物理ベースの破壊シミュレーション

物理ベースの破壊シミュレーションには、Pfaffらの手法^{3),7),8)}を実装したARCSim⁴⁾を用いた。シミュレーションは3次元空間で行い、対象の3Dオブジェクトの重心を中心とした球面上のランダムな位置から、対象オブジェクトに向けて球状のオブジェクトを射出するという条件を設定した。

3.2.2 入力画像の作成

黄らは入力画像としてFCM(力条件マップ)を用いた¹⁾。黄らのFCMは衝突オブジェクトの対象オブジェクトに対する軌跡の投影を積算したものであり、衝突オブジェクトの形状と速度を表している。青木らはFCMにバネ質点モデルに基づいて求めたメッシュの格子点の変位を用いて、衝突オブジェクトの質量と速度を考慮できるようにした²⁾。

本研究では、対象を立体的なオブジェクトに拡張するため、FCMの代わりに表面の法線情報を2次元に展開したノーマルマップを用い、そこに衝突位置を描き加えて入力画像を作成する。ノーマルマップはオブジェクトの表面形状を2次元的に表現する一般的な手法である。

ノーマルマップを作成するために、まず、対象オブジェクトをパラメータ化する。本研究では後の学習がしやすいように、正方形にパラメータ化した。対象オブジェクトのパラメータ化の結果を図1に示す。

このパラメータ化について、本研究の実験で使用したオブジェクトは閉じた曲面のため、シーム(切れ目)を入れた後に、それを境界として展開する必要がある。具体的には、対象オブジェクトの表面から手動で3つの頂点を指定し、それらを結ぶ線をシームとして設定する。なお、指定した3頂点はそれぞれ正方形上の左上、右下、および残りの対角に位置する頂点に対応する。このシームを境界として、閉じた曲面である対象オブジェクトの表面を一つの連続した2D空間に展開した。この実装にはCGAL¹⁰⁾のパラメータライブラリ¹¹⁾を使用し、アルゴリズムには面積の歪みを抑えることができる離散等面積パラメータ化を用いた。

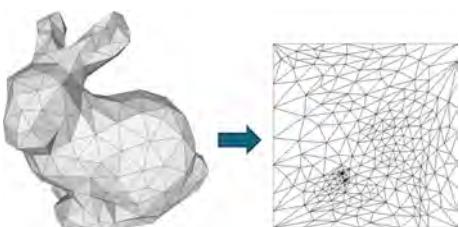


図1 対象オブジェクトの頂点パラメータ化
Fig.1 Parameterization of target object

次に、対象オブジェクトの頂点の法線を求め、パラメータ化後のメッシュの対応する頂点に色として割り当てる。最後に、頂点の色をメッシュのポリゴン内で補間して、ノーマルマップを作成する。図2に対象オブジェクトの頂点の法線情報と、それをパラメータ化したノーマルマップの例を示す。

パラメータ化した対象オブジェクトのノーマルマップを用いることにより、オブジェクトの全周の表面形状を一枚の画像で表現できる。このノーマルマップにARCSimによる物理ベースの破壊シミュレーションで用いた球状のオブジェクトの衝突位置を黒い円で描き込んだものを入力画像とした。したがって、この入力画像はFCMと異なり衝突オブジェクトに関しては衝突位置のみ保持する。この例を図3に示す。

3.2.3 正解画像の作成

正解画像には先行研究^{1),2)}同様、FSPM(破壊分割パターンマップ)を用いる。ただし、本研究では立体的な中空オブジェクトを対象とするため、シミュレータで得た3次元の亀裂パターンもパラメータ化し、対象オブジェクトをパラメータ化したメッシュ上にマッピングする。

この手順は、まず破壊シミュレーションにおいて、対象オブジェクトの表面に生成された亀裂を取得する。この例の亀裂は、対象オブジェクトに球が衝突してから20フレーム目のものである。これは提案手法において、初衝突以降の衝突によって起こる亀裂については本研究では対象外としており、初衝突後の亀裂の進展が約20フレームで収束するためである。

次に、得られた亀裂を前項で作成したパラメータ化メッシュ上に座標変換する。そのため、あらかじめ亀裂の頂点の対象オブジェクト上の重心座標を求めておく。

これはパラメータ化前の対象オブジェクトにおいて、亀裂を構成する頂点の重心座標 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ を、式(1)により求

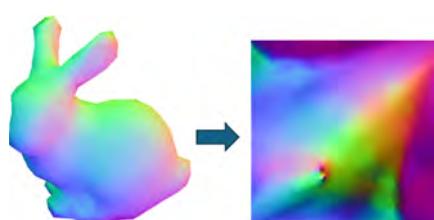


図2 オブジェクトの法線情報とノーマルマップ
Fig.2 Normal information and normal map

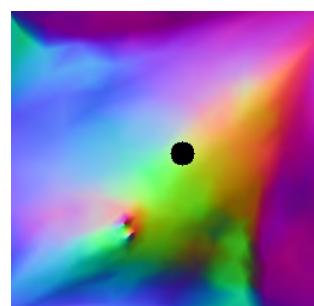


図3 入力画像の例
Fig.3 An example of input image

める。 \mathbf{p} は対象となる頂点, $\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ はそれぞれ \mathbf{p} と同一平面上にあり内側に \mathbf{p} が存在する三角形の頂点である。また $A_{\Delta \mathbf{v}_i \mathbf{v}_j \mathbf{v}_k}$ は三角形 $\Delta \mathbf{v}_i \mathbf{v}_j \mathbf{v}_k$ の面積を表す。

$$\lambda_0 = \frac{A_{\Delta \mathbf{p} \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2}}{A_{\Delta \mathbf{v}_0 \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2}}, \lambda_1 = \frac{A_{\Delta \mathbf{p} \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_0}}{A_{\Delta \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_0}}, \lambda_2 = \frac{A_{\Delta \mathbf{p} \mathbf{v}_0 \mathbf{v}_1}}{A_{\Delta \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_0 \mathbf{v}_1}} \quad (1)$$

この重心座標とパラメータ化後のメッシュの対応する三角形の頂点座標 $\mathbf{v}'_i, \mathbf{v}'_j, \mathbf{v}'_k$ から、式 (2) によりパラメータ空間上の亀裂の頂点位置 \mathbf{p}' を求める。これにより、パラメータ化前の3次元空間における亀裂パターンの頂点座標は、パラメータ化メッシュ上の座標へ一対一に変換される。なお、使用するパラメータ化メッシュは対象オブジェクトにつき一つ作成し、各破壊シミュレーションの結果は、それにマッピングするものであるため、一貫した座標変換が可能である。

$$\mathbf{p}' = \lambda_0 \mathbf{v}'_0 + \lambda_1 \mathbf{v}'_1 + \lambda_2 \mathbf{v}'_2 \quad (2)$$

図4にARCSimを用いた破壊シミュレーションによる亀裂と、そのパラメータ空間へのマッピングの例を示す。

最後に、このパラメータ空間上の亀裂から距離場を求めてFSPMを作成する。FSPMに距離場を用いることにより、閾値処理により亀裂が多少途切れても、亀裂形状の抽出を安定して行える。図5に得られたFSPMの例を示す。

3.2.4 cGANによる学習

作成した入力画像と正解画像をペアにしたデータセットを作成し、cGANによる学習を行った。本研究では400組の画像ペアによるデータセットを用い、cGANのアルゴリズムに黄ら¹⁾が採用したpix2pix⁶⁾と、青木ら²⁾が生成結果の多様性向上のために採用したMode Seeking GAN (MSGAN)⁹⁾について、それぞれの有効性を検証した。

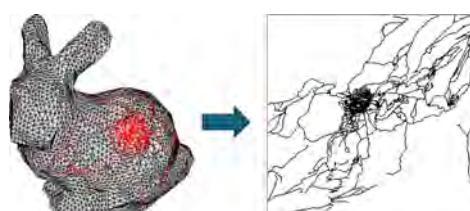


図4 オブジェクト表面上の亀裂とそのパラメータ化の例
Fig. 4 An example of crack on object surface and its parameterization

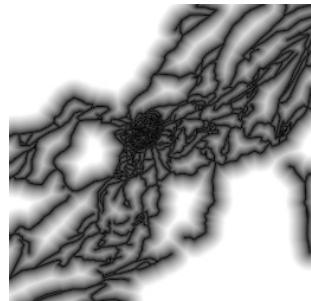


図5 亀裂のFSPMの例
Fig. 5 An example of FSPM for cracks

3.3 学習結果を用いた破片オブジェクトの生成

前項で作成した学習済みの生成器を用いて、剛体シミュレーション中の衝突により発生する破片オブジェクトを生成する。剛体シミュレーションにはUnity¹²⁾を使用した。

3.3.1 学習済み生成器によるFSPMの生成

対象オブジェクトに対して衝突が発生したとき、3.2.2の手順によりノーマルマップに衝突点の座標を書き加えて入力画像を作成し、学習済みの生成器に入力してFSPMを得る。

3.3.2 Watershedアルゴリズムを用いた頂点抽出

前項で生成したFSPMから、Watershedアルゴリズム¹³⁾により破片の頂点情報を抽出する。Watershedアルゴリズムは画像の輝度値を山の高さに見立て、そこに水を流すように閾値を徐々に上げて領域を広げていくことにより、領域分割を行う手法である。このとき、分割したい各領域にマーカーと呼ばれる領域の核を作り、このマーカーから隣接ピクセルに領域を広げていくことで、各領域の境界を維持しながら亀裂の連続性を考慮した領域分割が可能になる。

本研究ではWatershedアルゴリズムのMeyer¹⁴⁾による実装であるOpenCV¹⁵⁾の関数 `cv::watershed()` を使用し、Image Segmentation And Mathematical Morphology¹⁶⁾を参考に領域分割処理を実装した。図6(a)にFSPMの結果、同図(b)にその領域分割結果を示す。領域分割の結果は領域ごとにランダムな色を設定している。この各領域の外周を追跡して、各破片の頂点を抽出する。

3.3.3 破片のメッシュ化

前項で取得した各破片の頂点情報を基にメッシュを作成し、破片をオブジェクト化する。

これは、まずパラメータ化された対象オブジェクトのメッシュを、前項で取得した各破片ごとの頂点群で囲まれた領域で分割(クリッピング)する。これにより、対象オブジェクトの頂点情報を維持しながら、破片形状のポリゴンに切り分けることができる。このとき、破片ポリゴンが四角形以上の場合には、Unityで扱えるように三角形分割する。図7にパラメータ化したメッシュ(a)と、そのクリッピング処理と三角形分割の結果(b)の例を示す。

続いて、得られた破片ポリゴンを使って、元オブジェクト

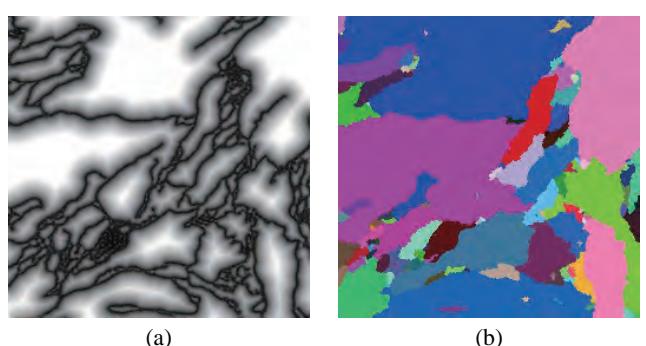


図6 Watershedアルゴリズムによる領域分割
Fig. 6 Watershed segmentation

の形状を再構成する。この処理はパラメータ化の前後の頂点情報が一对一の対応関係になっていることを利用して、破片ポリゴンを元オブジェクトの形状に沿うように配置する。

最後に、配置した各破片ポリゴンの頂点に対して、その位置を押し出し処理により法線方向に押し出して厚みを付けてメッシュ化し、立体の破片オブジェクトを生成する。図8に破片オブジェクトを用いて元オブジェクトの形状を再構成した結果を示す。

4. 実験と評価

本節では3.3の手順による対象オブジェクトの破壊の様子と、3.2の前処理により得られたFSPMについて評価した。

4.1 提案手法の実装例の視覚評価

図9と図10に、ウサギの形をした対象オブジェクトに球形のオブジェクトを衝突させたときの経過を示す。ウサギのポリゴン数は528である。

両図の左端は衝突直前の状況、中央は衝突直後に3.3の処理により対象オブジェクトを破片オブジェクトで置き換えた結果、右端は衝突後に生成された破片オブジェクトが飛散した様子である。cGANにはpix2pixを使用し、飛散のシミュレーションにはUnityの物理演算機能を使用した。

図9の結果を見ると、額の衝突位置周辺に亀裂が形成され、応力が集中する部分では亀裂の進展が抑制されている。特に、首元のような大きく折れ曲がる部分を境に亀裂の伝搬が制限され、球状のオブジェクトの衝突により、衝突位置の周辺のみが破壊された。

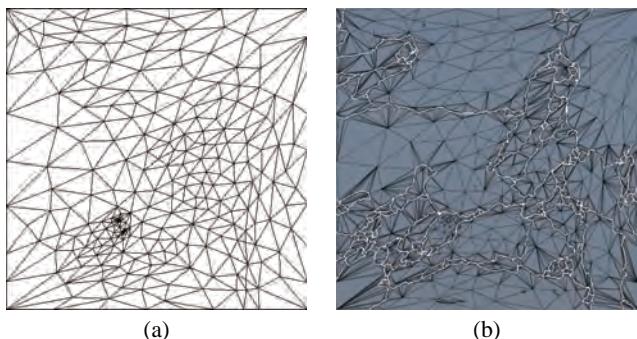


図7 クリッピング処理と三角形分割の結果の例
Fig.7 An example of clipping and triangulation results

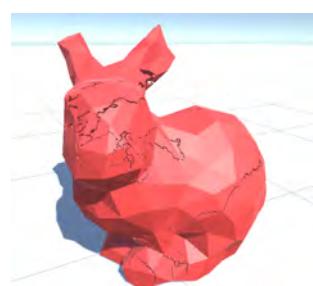


図8 破片オブジェクトで再構成した元オブジェクト
Fig.8 Reconstructed original object from fragmentation mesh

一方、図10では、衝突位置を耳の先端に設定し、耳のみが局所的に破壊されることを期待した。しかし、亀裂は耳元や首元を超えて広範囲に進展し、最終的に対象オブジェクト全体が破壊された。このような広範囲な破壊は、物理ベースの破壊シミュレーションでは見られなかった。

この視覚評価の結果、提案手法は期待通りの破壊を再現できることが確認された。しかし、図10に示すように、意図しない広範囲な破壊も観測された。その一因として、学習データセットの特性が考えられる。

本研究では、衝突オブジェクトの対象オブジェクト表面に対する入射角を学習データに含めていない。このため、もし学習データセット内に亀裂が広範囲に進展しやすい入射角での衝突事例が多数含まれていれば、cGANの生成器がその傾向を強く学習してしまう可能性がある。図10の衝突箇所である耳の先端は他の部位に比べて局所的な曲率が大きく、表面の法線が急激に変化する領域である。このような形状的な特異点への衝突においては、学習データセットの潜在的なバイアスがより顕著に現れ、広範囲な破壊パターンが生成された可能性が示唆される。

4.2 pix2pix を用いた FSPM の生成

前項の破壊結果の視覚評価では詳細な検討が難しかったため、cGANによって生成されたFSPMについて評価した。以下ではcGANの学習アルゴリズムにpix2pixを用いた場合について述べる。実験にはテスト用に用意した100セットのデータを使用した。

4.2.1 pix2pix の生成器による出力の視覚評価

図11は、上段の入力画像から中段の物理ベースの破壊シミュレーションにより作成したFSPMと、下段のpix2pixの生成器を用いて生成したFSPMを比較したものである。

pix2pixによるFSPMは、物理ベースの破壊シミュレー



図9 対象オブジェクトの‘頭部’に衝突させた場合
Fig.9 Collision at the ‘head’ of the target object



図10 対象オブジェクトの‘耳’に衝突させた場合
Fig.10 Collision at the ‘ear’ of the target object

ションによる FSPM と比較して、亀裂の分布や進展方向が類似していることが確認できる。また、距離場に基づく亀裂周辺の明度のグラデーションも再現されている。さらに、入力画像中の黒い円で示す衝突位置の周辺に亀裂が集中していることも確認できる。これらを含むテスト用データ 100 セットで同様の結果が得られており、pix2pix の生成器が衝突位置の情報を適切に反映していることがわかる。

一方、図 12 は、それぞれの衝突位置を意図的に近くに設定し、上段の入力画像を互いに類似させたときの出力結果である。この場合、中段の物理ベースの破壊シミュレーションによる FSPM は顕著に異なるが、下段の pix2pix の生成器を用いて生成した FSPM は酷似している。

以上の結果から、pix2pix の生成器は FSPM をある程度の精度で再現できるが、微小な条件変化に対する感度が低いことが確認された。この結果は、pix2pix が用いる L1 損失閾

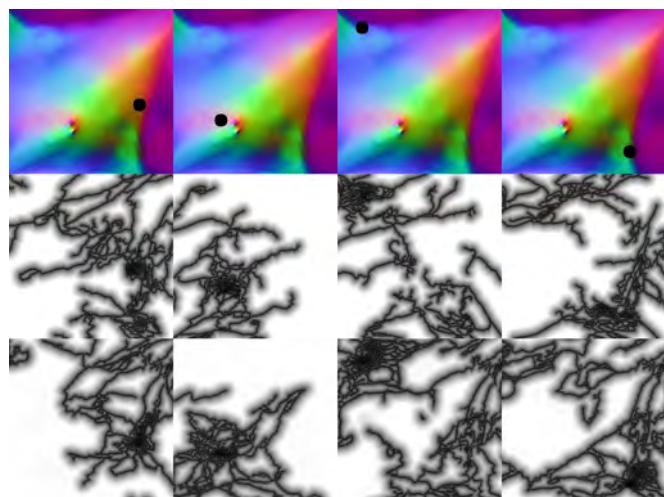


図 11 入力画像に対する物理ベースと pix2pix による FSPM
Fig. 11 Physics-based and pix2pix-based FSPM for the input image

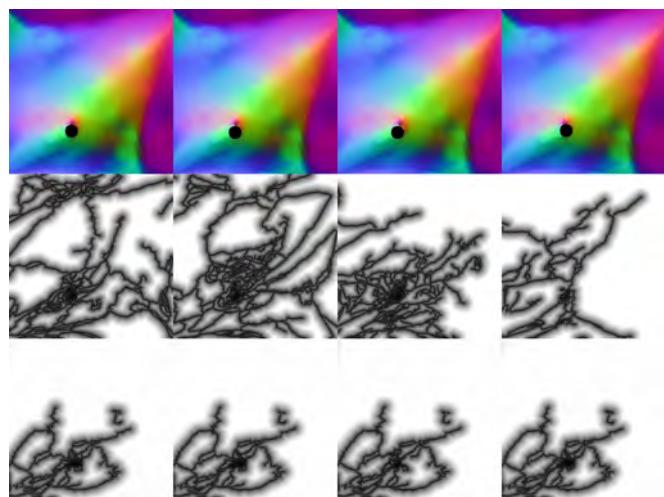


図 12 差異の小さな入力画像に対する物理ベースと pix2pix による FSPM
Fig. 12 Physics-based and pix2pix-based FSPM for input images with small differences

数の特性に起因すると考えられる。L1 損失は生成画像と正解画像のピクセル単位の絶対差を最小化するため、画像全体の傾向を示す低周波成分の学習には有効である。しかし一方で、入力画像の微小な変化に対応するような高周波成分の学習には向かない傾向がある。図 12 で類似した入力から酷似した出力が生成されたのは、この特性の現れだと示唆される。

したがって、pix2pix は物理条件の微小な変化に対する厳密な破壊結果を再現するタスクには限界があると言える。ただし、本研究の目的は物理シミュレーションを完全に再現することではなく、計算コストを抑えつつ視覚的にリアルな破壊の近似表現を高速に得ることにある。この目的に対して、全体的な傾向を捉える pix2pix の特性は妥当であると考える。しかし、このような変化の少ない出力画像から生成される破片の形状は、ユーザーに不自然さを感じさせる恐れがある。

4.2.2 pix2pix による FSPM の密度分布による評価

視覚評価のみに基づく考察は客観性に乏しいため、物理ベースの破壊シミュレーションにより作成した FSPM と、pix2pix の生成器を用いて生成した FSPM の類似性の定量的な評価を行った。これは、まず亀裂の密度分布マップを作成し、それに対して構造類似度指数 (Structural Similarity Index Measure, SSIM)¹⁷⁾を求める。SSIM の値は -1 から 1 の範囲で表され、1 に近いほど 2 つの画像が類似していることを示す。

図 13 は、図 11 の中段と下段に示した FSPM の密度分布マップである。これらを含め、テスト用データ 100 セットすべてについて密度分布マップを生成し、SSIM の値を計算した。その結果、SSIM は平均 0.578、標準偏差 0.108 となった。

この結果から、pix2pix による FSPM は物理ベースの破壊シミュレーションによる FSPM と中程度の類似性が存在すると見える。SSIM の 0.578 という値は、FSPM が完全には一致しないながらも顕著な違いではなく、ある程度の共通点が見られることを示している。また、標準偏差の 0.108 という値は、比較した FSPM 間で類似性に大きなばらつきがないことを示している。これにより生成された FSPM 全体では比較的一貫した類似性を示しており、特定の領域に顕著な相違が存在するわけではないことが確認された。

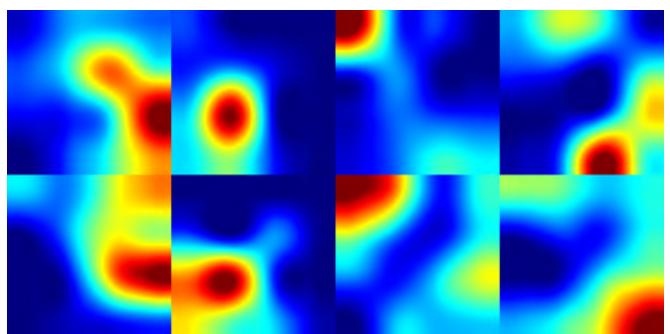


図 13 pix2pix による FSPM の密度分布マップ
Fig. 13 Density distribution map of the FSPM by pix2pix

4.3 MSGAN を用いた FSPM の生成

次に, cGAN の学習アルゴリズムに MSGAN を用いた場合について述べる. pix2pix の生成器では, 図 12 のように入力画像の差異が少ない場合に, モード崩壊により出力画像が互いに酷似したものになることがあった. そこで青木ら²⁾は, pix2pix に代えて MSGAN を採用した. MSGAN を用いれば出力画像の多様性の向上が期待できる.

本研究もこれに倣い, MSGAN の生成器を用いて生成された FSPM について評価した. 実験にはテスト用に用意した 100 セットのデータを使用した.

4.3.1 MSGAN の生成器による出力の視覚評価

図 14 は, 上段の入力画像から中段の物理ベースの破壊シミュレーションによる FSPM と, 下段の MSGAN の生成器を用いて生成した FSPM を比較したものである.

MSGAN による FSPM も, pix2pix による FSPM と同様

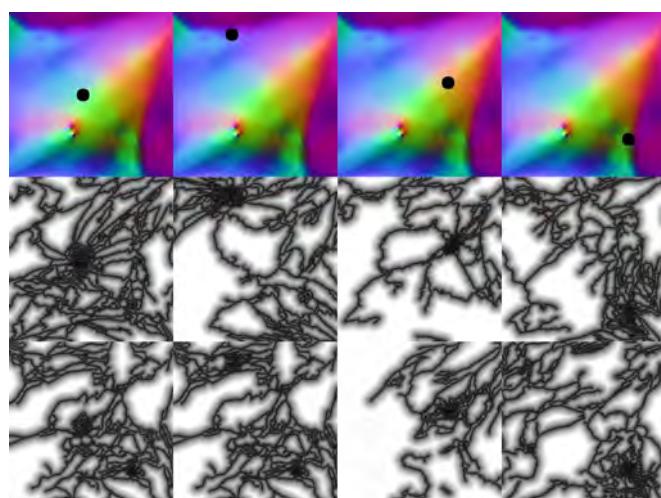


図 14 入力画像に対する物理ベースと MSGAN による FSPM

Fig. 14 Physics-based and MSGAN-based FSPM for input images

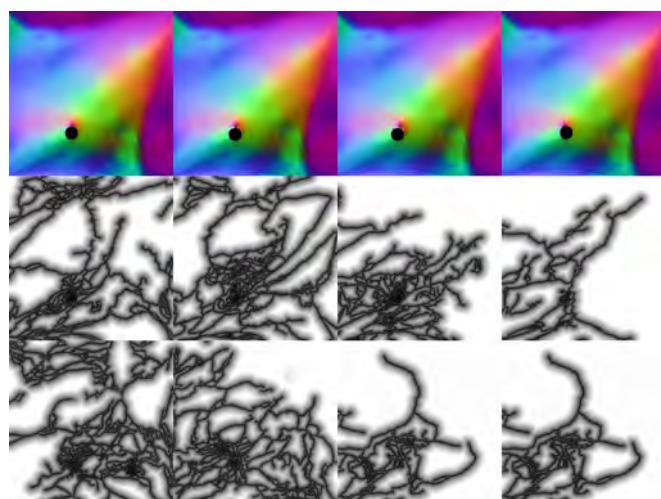


図 15 差異の小さな入力画像に対する物理ベースと MSGAN による FSPM

Fig. 15 Physics-based and MSGAN-based FSPM for input images with small differences

に, 物理ベースの破壊シミュレーションによる FSPM と比較において, 亀裂の分布や進展方向が類似していることが確認できる. また, 距離場に基づく亀裂周辺の明度のグラデーションも再現されている. さらに, 入力画像中の黒い円で示す衝突位置の周辺に亀裂が集中していることも確認できる. これらを含むテスト用データ 100 セットで同様の結果が得られており, MSGAN の生成器においても衝突位置の情報を適切に反映していることがわかる.

図 15 の上段の入力画像は, それぞれの衝突位置を意図的に近くに設定して入力画像を互いに類似させた, 図 12 の上段と同じものである. この場合の出力結果は, 下段の MSGAN の生成器を用いて生成した FSPM が互いに類似したものにならず, 中段の物理ベースの破壊シミュレーションにより作成した FSPM に類似したものになっている.

このように MSGAN の生成器は, pix2pix の生成器と比べて, 微小な条件変化に敏感であることが確認された. したがって, MSGAN は入力画像が類似していても, 多様な出力を生成できる. ただし, 破壊パターンのバリエーションが豊富であることはリアリティを高めるが, 例えば同じ素材では類似したパターンが生成されるべきである. 今後は多様性と一貫性のバランスを改善する必要がある.

4.3.2 MSGAN による FSPM の密度分布による評価

MSGAN の生成器を用いて生成した FSPM についても, pix2pix の場合と同様に亀裂の密度分布マップと, それらの SSIM により, 類似性を評価する.

図 16 は, 図 14 の中段と下段に示した FSPM の密度分布マップである. これらを含め, テスト用データ 100 セットすべてについて密度分布マップを生成し, SSIM の値を計算した. その結果, SSIM は平均 0.473, 標準偏差 0.134 となった.

この結果から, MSGAN による FSPM も物理ベースの破壊シミュレーションによる FSPM と中程度の類似性が存在すると言える. SSIM の 0.473 という値は pix2pix の 0.578 を下回るもの, この場合も FSPM 同士が完全には一致しないながらも顕著な違いはなく, ある程度の共通点が見られるることを示している. また, 標準偏差の 0.134 という値は, pix2pix の場合と同様に, 比較した FSPM 間で類似性に大

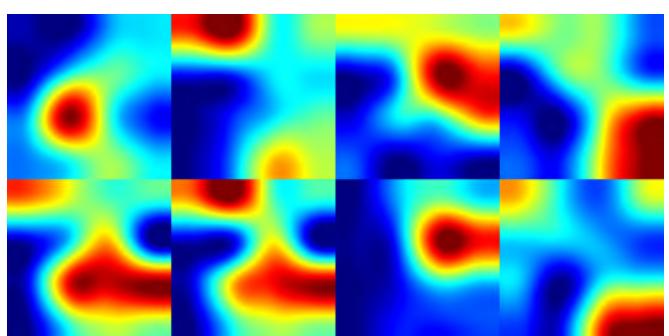


図 16 MSGAN による FSPM の密度分布マップ

Fig. 16 Density distribution map of the FSPM by MSGAN

きなばらつきがないこと示している。したがって、この場合も生成されたFSPM全体では類似性は比較的一貫しており、特定の領域に顕著な相違が存在するわけではないことが確認された。

4.4 計算時間の評価

本研究の各処理について計算時間を評価した。実行にはCPU AMD Ryzen™ 5 5600X 3.7GHz(最大4.6GHz), GPU GeForce RTX™ 3070, メモリ DDR4 32GB のPC上のWindows 11 HomeおよびWSL環境を使用した。

4.4.1 cGANによるFSPMの生成に要する時間

用意したテスト用データ100セットを用いて、FSPMの生成に要する時間を計測したところ、pix2pix 3.55ms(標準偏差0.83), MSGAN 4.30ms(標準偏差2.05)であった。なお、この処理についてはGPUを用いている。これは標準偏差を考慮しても、一般的なゲームのフレームレートの60fps(1フレームあたり約16.67ms)に対して十分に短い。

4.4.2 破片オブジェクト生成に要する時間

Unity上で対象オブジェクトに対して球状オブジェクトを衝突させ、その時間から生成された対象オブジェクトが破片オブジェクトで完全に置き換えられるまでの経過時間を計測した。この処理は、出力画像から破片の頂点を抽出するまでをPythonで実行し、その情報からメッシュを形成し厚みを持たせるなどの処理はUnity側のC#で行った。また、この間のデータのやり取りにはsocketを用いた。

この10回の試行の処理時間の平均は1.072秒で(標準偏差0.272)であった。これにはpix2pixによるFSPMの生成に要する時間も含んでいる。

ARCSimによる物理ベースの破壊シミュレーションでは試行ごとに2~5分の処理時間を要したため、提案手法は物理ベースの破壊シミュレーションに比べて大幅に処理時間を短縮できることが確認された。しかし、それでもリアルタイム処理には不十分であった。特に、標準偏差が比較的大きいことから、処理時間が破片オブジェクトの頂点数に大きく依存していると考えられる。

5. む す び

5.1 提案手法のまとめ

本稿では、リアルタイム性が求められる剛体シミュレーション環境において、物理ベースの破壊シミュレーションに類似した破壊形状を生成する、cGANを用いた中空オブジェクトの脆性破壊形状生成手法を提案した。この手法はcGANの入力画像にパラメータ化したノーマルマップに衝突点を描き加えた画像を用い、正解画像として3次元の物理ベースの破壊シミュレーションの結果をパラメータ化して生成した破壊分割パターンマップ(FSPM)を与える。これにより得られた学習済み生成器を用いて、破片形状を高速に生成する。

評価実験ではcGANのアルゴリズムにpix2pixとMSGANを用い、視覚評価と密度分布マップを用いた定量評価を行つ

た。その結果、両手法とも物理ベースの破壊シミュレーションに近い破片形状を生成可能であることが確認された。特にMSGANは生成結果の多様性が向上することが示された。また、計算時間の評価では、物理ベースの破壊シミュレーションに比べ大幅な処理時間短縮を確認し、リアルタイム処理には至らないものの、軽量な代替手段として一定の有効性を持つことを示した。

5.2 今後の課題

本稿では、対象形状がパラメータ化可能であることを前提とし、ウサギのモデルを用いた実験しか行っていないが、対象形状ごとに生成器を作成することにより、任意の形状に対応できる汎用性を有する手法であると考えている。それを明示するために、今後、少なくとも単連結ではない形状のオブジェクトについても適用例を示したい。さらに、未学習の形状に対応可能とすることも将来の課題といえる。

破片オブジェクトの形状はcGANの出力に依存するため、形状の再現性を高めるには学習精度の向上が必要である。また、対象オブジェクトが複雑な場合、パラメータ化の際に局所的な高密度領域が発生し、学習精度が低下する可能性がある。この点についても、より多様な形状のオブジェクトで検証を行い、適用可能なアプローチを検討する必要がある。また、現在の実装では、学習データにはシームを越える亀裂パターンが含まれているものの、生成されたFSPMから3次元の破片オブジェクトとして再構成する際に、シーム部分で亀裂の連続性が失われてしまう。今後の改善策として、シーム上に位置する亀裂の終点同士が一定距離以下であれば、それらを連結する後処理を実装し、近似的にシームを跨ぐ連続した亀裂を再現することが考えられる。

計算時間の評価では、大幅な処理時間短縮を確認したものの、リアルタイム処理には依然として課題が残る。これは、FSPMの生成に関してリアルタイム処理には十分な速度が得られるものの、そこからの破片オブジェクト生成に時間がかかるためである。これは、この処理がCPU単独で行われており、並列化も行われていないなど実装上に問題があるためである。今後、提案手法をビデオゲームやインタラクティブアプリケーションで活用するには、更なるアルゴリズムの改良や処理の並列化が求められる。

参考文献

- 1) 黄 宇航, 金井 崇: “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—”, 画像電子学会誌 Vol. 50, No. 4, pp. 558-567 (2021).
- 2) 青木 悠真, 床井 浩平: “cGANによる平面オブジェクトの脆性破壊形状の生成”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 48, No. 8, pp. 284-287 (2024).
- 3) T. Pfaff, et al.: “Adaptive Tearing and Cracking of Thin Sheets”, ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 33, No. 4, pp. 1-9 (2014).
- 4) R. Narain, A. Samii, T. Pfaff, J. F. O’Brien.: “ARCSim: Adaptive Refining and Coarsening Simulator”, <http://graphics.csail.mit.edu/research/ARCSim/>.

berkeley.edu/resources/ARCSim/ (2021).

- 5) M. Mirza, S. Osindero: "Conditional Generative Adversarial Nets", arXiv preprint arXiv:1411.1784 (2014).
- 6) P. Isola, et al.: "Image-to-image Translation with Conditional Adversarial Networks", Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1125-1134 (2017).
- 7) R. Narain, T. Pfaff, and J. F. O'Brien: "Folding and Crumpling Adaptive Sheets", ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 32, No. 4, pp. 1-8 (2013).
- 8) R. Narain, A. Samii, and J. F. O'Brien: "Adaptive Anisotropic Remeshing for Cloth Simulation", ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 31, No. 6, pp. 1-10 (2012).
- 9) Q. Mao, et al.: "Mode Seeking Generative Adversarial Networks for Diverse Image Synthesis", Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1125-1134 (2019).
- 10) CGAL, The Computational Geometry Algorithms Library, <https://www.cgal.org/> (2025).
- 11) L. Saboret, P. Alliez, B. Lévy, M. Rouxel-Labbé, A. Fabri, and H. Jain: "Triangulated Surface Mesh Parameterization", In CGAL User and Reference Manual. CGAL Editorial Board, 6.0.1 edition, (2024). https://doc.cgal.org/latest/Surface_mesh_parameterization/index.html (2025).
- 12) Unity, Unity のリアルタイム開発プラットフォーム — 2D/3D、VR/AR エンジン, <https://unity.com/ja> (2025).
- 13) J. P. Serra: "Image Analysis and Mathematical Morphology", Academic Press (1982).
- 14) F. Meyer: "Color Image Segmentation", 1992 International Conference on Image Processing and Its Applications, The Institution of Engineering and Technology (IET) (1992).
- 15) OpenCV, Open Computer Vision Library, <https://opencv.org/> (2025).
- 16) S. Beucher: The Watershed Transformation Page, <https://people.cmm.minesparis.psl.eu/users/beucher/wtshed.html> (2025).
- 17) W. Wang, Z. Zhou, et al.: "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity", IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 13, No. 4, pp. 600-612 (2004).

(2025年3月10日受付)

(2025年8月29日再受付)

青木 悠真



2023年 和歌山大学システム工学部卒業, 2025年 和歌山大学システム工学研究科修了. 現在, 株式会社 Link-U Technologies 勤務. 在学中は機械学習による破壊シミュレーションの高速化に関する研究に従事.

床井 浩平 (正会員)



1986年 豊橋技術科学大学大学院工学研究科修了, 同年 和歌山大学経済学部助手, 講師, 助教授を経て, 1997年 和歌山大学システム工学部助教授, 現在准教授. 博士 (工学, 大阪大学). コンピュータグラフィックスおよび関連分野の研究に従事. 画像電子学会, 芸術科学会, 映像情報メディア学会, 情報処理学会, 電子情報通信学会, ACM 各会員.

PolySlerp: 球面多角線形補間

中山 雅紀[†](正会員) 藤代 一成[†](名誉会員)

[†]慶應義塾大学

PolySlerp: Spherical Polygon Linear Interpolation

Masanori NAKAYAMA[†](Member), Issei FUJISHIRO[†](Honorary Member)

[†]Keio University

〈あらまし〉 本論文は, n 次元実数空間 \mathbb{R}^n の単位ベクトル群を, 球面幾何学に基づいて, ベクトル長を保持しつつ加重平均する新たな手法を提案する. この手法は, 球面 S^{n-1} 上の複数の頂点に対する重心座標系の定義に相当する. 従来から, 2 本の単位ベクトル間では球面線形補間 (Spherical Linear Interpolation: Slerp) が広く用いられてきたが, 3 本以上の単位ベクトル間の加重平均には, 球面幾何学的な正当性を欠く近似的な手法しか存在しなかった. 提案手法は, Slerp を拡張した独自のベクトル演算子を導入することでこの課題を解決し, 単位ベクトルを保ったまま加重平均 (PolySlerp) を実現する. さらに, このベクトル演算子を用いることで, 球面上の点列に基づくスプライン曲線の生成や, 球面多角形における重心座標系の定義が可能であることを示す. 基本的に球面上の曲線は, ユークリッド空間における既存の曲線手法を球面へ拡張することで得られる. しかし, その例は従来, Bézier 曲線や B-spline 曲線などに限られていた. これは, それらが[†] de Casteljau や de Boor に代表される再帰的な線形補間 (Linear Interpolation: Lerp) によって定義できる特殊な曲線であり, Lerp を Slerp に置換することで球面への拡張が容易であったためである. しかし, 本来, 曲線は離散的なデータ列をフィルタリングして平滑化する信号処理であり, あらゆる基底関数が想定できる. 例えば, 画像の補間手法として一般的な Lanczos 補間も, sinc 関数を基底関数とした一種の曲線手法であるといえる. このとき, 我々の提案する PolySlerp によって, 球面上での加重平均 (線形ブレンド) が行えるということは, ユークリッド空間における様々な既存の信号処理手法を, そのまま球面上へ拡張できることを意味する. したがって本手法は, モデリング, アニメーション, ロボティクス, 空間データ解析など幅広い分野で利用されている単位四元数の補間において, 重要な役割を果たすことが期待される.

キーワード : 球面線形補間, スプライン曲線, Bézier 曲線, B-spline 曲線, 四元数

〈Summary〉 In this paper, we introduce a novel method for weighted averaging of unit vectors in \mathbb{R}^n based on spherical geometry. Our approach defines a barycentric coordinate system for multiple points on the unit sphere S^{n-1} . Although Spherical Linear Interpolation (Slerp) has been widely used for interpolating between two unit vectors, existing methods for handling three or more unit vectors are largely approximate and lack a rigorous geometric foundation on the sphere. To fill this gap, we present a vector operator that generalizes Slerp, enabling precise weighted averaging while preserving unit length. Furthermore, we demonstrate that this operator facilitates the generation of spline curves from discrete point sets on the sphere and establishes barycentric coordinates for spherical polygons. In general, curves on the sphere can be obtained by extending existing curve constructions in Euclidean space to the spherical setting. Historically, however, representative examples have essentially been limited to Bézier curves and B-spline curves. This is because these are special classes of curves that admit definitions via recursive linear interpolation (Lerp)—as exemplified by the de Casteljau and de Boor algorithms—so that replacing Lerp with Slerp makes the spherical extension straightforward. Fundamentally, however, curve construction is a signal processing operation that filters and smooths a discrete data sequence, and in principle any basis function can be considered. For example, Lanczos interpolation—commonly used in image interpolation—can be regarded as a type of curve construction whose basis function is the sinc function. In this context, the fact that our PolySlerp enables weighted averaging (linear blending) directly on the sphere implies that a wide range of existing signal processing techniques developed in Euclidean space can be carried over to the spherical domain without modification. Our method, therefore, proves especially valuable for interpolating unit quaternions, which are expected to be central to a broad range of applications, including modeling, animation, robotics, and spatial data analysis, where accurate and robust handling of unit vector data is essential.

Keywords: Slerp, spline curve, Bézier curve, B-spline curve, quaternion

1. 序論

コンピュータアニメーションや3Dモデリングの分野において、剛体の回転と位置の制御は依然として最も基本的かつ重要な課題の一つである。特に、空間上の回転は非ユークリッド的な性質を有するため、滑らかで正確な補間を実現する手法は、アニメーションやロボティクス、さらにはデータ解析など、幅広い応用分野で注目を集めている。

従来、回転を表現する手法としてオイラー角や回転行列が広く利用されてきたが、ジンバルロックの問題や演算コストの高さなどの欠点が指摘されてきた。一方、単位四元数による回転表現は特異点を回避でき、演算効率にも優れることから、実用面で大きな利点をもつ。しかし、単位四元数を用いた回転を滑らかに補間するには、非ユークリッド空間である球面 S^3 上の幾何学的整合性を考慮したアルゴリズム設計が不可欠である。

2点間の単位ベクトルや単位四元数を補間する手法としては、いわゆる球面線形補間 (Spherical Linear Interpolation: Slerp)¹⁾ がよく知られている。しかし、3点以上の補間や加重平均を行う際には、球面幾何学的性質を正しく反映できる手法が限られており、長らく近似的な処理に頼らざるを得ない状況が続いていた。

本論文では、この課題を解決するため、新しい加重平均手法を提案する。本手法では、Slerp を拡張した独自のベクトル演算子を導入し、複数の単位ベクトルや四元数の加重平均を球面幾何学に即して正確に計算できるようにする。また、同演算子を用いることで、球面上の点列をもとにしたスプライン曲線の構築や、球面多角形に対する重心座標系の自然な定義が可能であることを示す。

2. 関連研究

Shoemake¹⁾ は、球面上での線形補間手法である Slerp を提案した。この手法は、ユークリッド空間において 2 本の単位ベクトルを対象に、ベクトル長を保持したまま両者のなす角度を線形に内分するベクトルを生成するものである。さらに Slerp は、単位ベクトルの次元に依存しないため、4 次元ベクトルとして表現される単位四元数の補間にも適用可能であり、CG 分野では回転制御に広く利用された。また、ド・カステリョ (de Casteljau) のアルゴリズムにおける線形補間を Slerp に置き換えることによって球面 Bézier 曲線を定義し、キーフレームで与えられた複数の回転を高次曲線として滑らかに補間する手法も示されている。

Shoemake²⁾ はさらに、Boehm¹³⁾ が示した双曲放物面上の三次スプライン曲線を Slerp で再定義し、4 点からなる制御性の高い球面スプライン曲線 Squad を提案した。また、非可換な積分演算を対数空間での可換な加算で近似する Exponential Map (Exp Map) の手法を四元数に応用し、近似的な可換加重平均を実現することで、球面曲線の導関数を

扱いやすくしている。

Barr ら³⁾ は、複数の四元数を通過しつつ総曲率が最小となる球面スプライン曲線を提案した。ただし、有限差分法に基づいて滑らかな補間点を離散的に求める必要があるため、最終的にはこれらの補間点間を Slerp で結ぶ折れ線近似によって曲線を構成しなければならない。

Wang ら⁴⁾ は、Slerp が大円に沿った線形補間であるのに対し、2つの小円 (biarc) によって 2 点を補間する手法を示した。球面上の 2 点とその接線が与えられると小円はただ一つに定まり、接線を指定できるため、複数の小円を C^1 連続で接続することによって長い球面曲線を構成可能である。小円はユークリッド空間内の有理 Bézier 曲線として表現されるが、曲線自体は球面上に張り付いているため、補間ベクトルの長さは保たれる。

Kim ら⁵⁾ は、ユークリッド空間における Bézier 曲線、Hermite 曲線、B-spline 曲線などを球面曲線へ統一的に拡張するフレームワークを示した。これは Exp Map に依存しており、球面幾何学的には厳密ではないが、既存の各種曲線を球面へ容易に適用できるという利点がある。さらに、Kim ら⁶⁾ はこのフレームワークを応用し、球面上のすべての頂点列を通る C^2 連続な球面 B-spline 曲線を提案した。本来 B-spline 曲線は制御点を通らないが、反復的な逆算によって制御点を補正し、頂点列を通るようにしている。ただし計算過程で Exp Map を使用しているため、依然として球面幾何学的な厳密性には欠ける。

Ramamoorthi ら⁷⁾ は、まずユークリッド空間内で球面に沿う三次スプライン曲線を生成し、その後、得られたベクトルを正規化することで高速かつ近似的な球面スプラインを得る手法を提案した。ただし、この方法では原理的にベクトル長が保存されないため、球面幾何学的に正しい曲線とはいえない。

Dam ら⁸⁾ は、バネの運動方程式に基づく球面スプライン Spring を提案した。しかし、Barr ら³⁾ の手法と同様、補間点を離散的に求める必要があり、最終的には Slerp による折れ線近似が不可欠となる。したがって、連続的な球面曲線は得られず、近似的な手法にとどまっている。

Eberly⁹⁾ は、Squad を C^1 連続に接続する手法を示したが、1987 年の Shoemake²⁾ と同様に Exp Map に依存しているため、球面幾何学的に厳密ではない。

Buss ら¹⁰⁾ は、球面上の測地的な距離にもとづく最適化問題を反復法で解くことにより、独自の球面重心座標 (球面加重平均) を提案した。この球面加重平均によって、ユークリッド空間の Bézier 曲線や B-spline 曲線を代数的に直接球面へ拡張可能である。また、Exp Map を用いないため球面幾何学的な正当性が高く、4 次元ベクトルである四元数だけでなく任意次元の単位ベクトルにも適用可能である。

Ge ら¹¹⁾ は、Kim ら⁵⁾ による球面 B-spline 曲線の枠組みに着想を得ながらも、Slerp に基づいた新たな (非可換な)

四元数演算子を導入することで、球面幾何学的に妥当性を欠く Exp Map を回避しつつ、複数ベクトルの加重平均を実現した。さらに、細分割曲線手法である四点細分割法 (4-point scheme) を球面へ拡張し、補助点を生成することによって球面 B-spline 曲線の局所的な制御性を高める手法を示している。

3. 従来手法

n 次元のユークリッド空間 \mathbb{R}^n における単位ベクトル \mathbf{v} は、 $(n-1)$ 次元の超球面 S^{n-1} 上の座標点 \mathbf{s} に対応する。本論文では、球面上の座標点列 $\{\mathbf{s}_0, \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots\}$ が与えられたとき、媒介変数 $t \in [0, 1]$ に応じて、曲線上の補間点 \mathbf{s}_t をどのように求めるかという手法について論じる。生成される曲線は、導関数の連続性に基づいて大きく二分される。すなわち、位置 (0 次導関数) のみが連続である C^0 連続を保証する線形補間と、1 次導関数以上の連続性 (たとえば C^1 や C^2 など) を保証する非線形補間である。

3.1 線形補間

線形補間とは、隣接する 2 点間の座標を区別的に直線で結ぶ手法であり、全体としては折れ線を形成する。このとき、各区間の接点では位置座標のみが連続し、接線や曲率は不連続のままであるため、全体として C^0 連続に分類される。ユークリッド空間での線形補間 (Linear Interpolation: Lerp) は式 (1) のように表されるが、単位ベクトルに対して単純に適用すると、ベクトルの長さが変化してしまう。

$$\text{Lerp}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2; t) = (1-t)\mathbf{v}_1 + t\mathbf{v}_2. \quad (1)$$

3.1.1 Glerp: Gnomonic Lerp

最も単純な球面補間手法として、まずユークリッド空間で Lerp を行い、その後正規化して単位ベクトルに戻す方法が挙げられる。ここでは便宜的に Gnomonic Lerp (Glerp) とよび、式 (2) のように表す。

$$\text{Glerp}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2; t) = \frac{\text{Lerp}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2; t)}{\|\text{Lerp}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2; t)\|}, \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ はいずれも単位ベクトルである。この正規化操作は、球面の中心から見た心射図法 (Gnomonic Projection) の逆問題に相当する。Lerp による補間点はパラメータ t に対して等速で変化するため、一見すると自然な拡張にみえる。しかし、補間点を球面へ投影 (正規化) すると、球面上の軌跡は大円に含まれるもの、球面上では等角速度にならないため、厳密な意味での線形補間とはならない。

3.1.2 Slerp

2 本の単位ベクトル $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ がなす角度を、パラメータ t に応じて線形に内分するよう定義された手法が Slerp であり、式 (3) のように定義される。

$$\begin{aligned} \text{Slerp}(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2; t) &= \frac{\sin((1-t)\theta)}{\sin(\theta)} \mathbf{v}_1 + \frac{\sin(t\theta)}{\sin(\theta)} \mathbf{v}_2, \quad (3) \\ \theta &= \arccos(\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2), \end{aligned}$$

ここで、ベクトルのノルムは常に 1 に保たれ、かつ角度 θ が t に対して線形に変化するため、球面上における回転速度 (角速度) が一定になる (等角速度) という利点がある。また、本手法は任意次元の単位ベクトルに適用可能であり、特に単位四元数の場合、式 (4) のような累乗形式で表されることが多い。

$$\begin{aligned} \text{Slerp}(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2; t) &= \mathbf{q}_1 (\mathbf{q}_1^{-1} \mathbf{q}_2)^t \\ &= \mathbf{q}_1 \exp(t \ln(\mathbf{q}_1^{-1} \mathbf{q}_2)). \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、この Slerp を区別的に適用して区間を連結した場合、各接点における接線や曲率は不連続のままである。結果として、全体としては C^0 連続にとどまる。

3.2 非線形補間

非線形補間とは、座標点列を非線形多項式などの曲線で連結し、 C^1 以上の連続性を保証する補間手法である。位置座標の連続性だけでなく、接線や曲率の連続性も考慮することで、より滑らかな曲線を得ることができる。

3.2.1 再帰的線形補間

ユークリッド空間で広く用いられている補間曲線のなかには、多項式を明示的に構築するのではなく、再帰的な Lerp の繰り返しによって定義されるものがある。その前提があれば、Lerp を Slerp へ置き換えることで、数学的に正しく球面曲線へ拡張することができる。そのような曲線を、ここでは便宜的に 再帰的 Slerp (RecSlerp) とよぶこととする。

Bézier curve Bézier 曲線は、ド・カステリョのアルゴリズムによって、再帰的な線形補間として定義できる。たとえば、4 つの制御点 $\{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4\}$ から構成される 3 次 Bézier 曲線における補間点 \mathbf{p}_t は、式 (5) のように与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_1 &= \text{Lerp}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2; t), & \mathbf{a}_2 &= \text{Lerp}(\mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3; t), \\ \mathbf{a}_3 &= \text{Lerp}(\mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4; t), & & \\ \mathbf{b}_1 &= \text{Lerp}(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2; t), & \mathbf{b}_2 &= \text{Lerp}(\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3; t), \\ \mathbf{p}_t &= \text{Lerp}(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2; t). & & \end{aligned} \quad (5)$$

このアルゴリズムでは高次多項式を明示的に扱わず、線形補間のみで曲線を生成できる点が特徴的である。つまり、このアルゴリズム中の Lerp を Slerp に置き換えることで、球面幾何学的に自然な球面 Bézier 曲線に拡張することが可能となる (図 1(a))。なお、式 (5) の計算過程は、式 (6) の 3 次多項式と等価である。

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_t &= (1-t)^3 \mathbf{p}_1 + 3t(1-t)^2 \mathbf{p}_2 \\ &\quad + 3t^2(1-t) \mathbf{p}_3 + t^3 \mathbf{p}_4. \end{aligned} \quad (6)$$

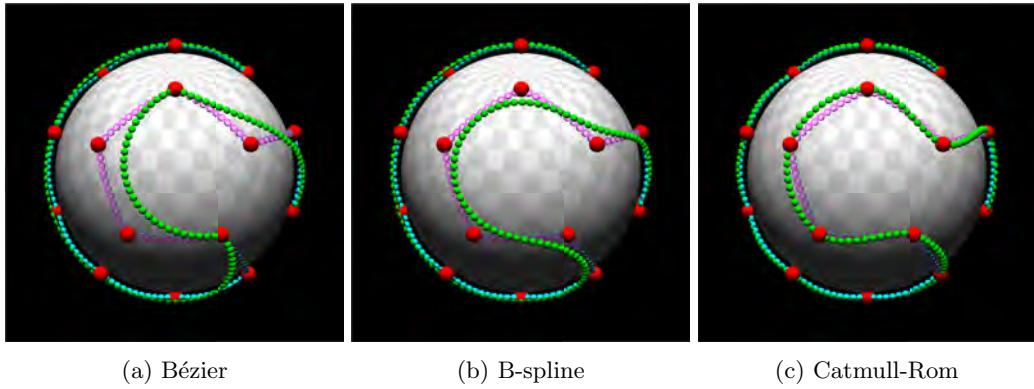


図 1 RecSlerp による球面曲線
Fig. 1 Spherical curves by RecSlerp

B-spline curve B-spline 曲線は、ド・ブーア (de Boor) のアルゴリズムによって、再帰的な線形補間として定義できる。たとえば、4つの制御点 $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ から構成される3次 B-spline 曲線における補間点 p_t は、式 (7) のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \text{Lerp}\left(p_1, p_2; \frac{t+2}{3}\right), \\
 a_2 &= \text{Lerp}\left(p_2, p_3; \frac{t+1}{3}\right), \\
 a_3 &= \text{Lerp}\left(p_3, p_4; \frac{t}{3}\right), \\
 b_1 &= \text{Lerp}\left(a_1, a_2; \frac{t+1}{2}\right), \\
 b_2 &= \text{Lerp}\left(a_2, a_3; \frac{t}{2}\right), \\
 p_t &= \text{Lerp}\left(b_1, b_2; t\right).
 \end{aligned} \tag{7}$$

ここでも、アルゴリズム中の Lerp を Slerp に置き換えることで、球面幾何学的に自然な球面 B-spline 曲線に拡張可能である (図 1(b))。なお、この計算過程は式 (8) の3次多項式と等価である。

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \frac{1}{6} \left[(1-t)^3 p_1 + (3t^3 - 6t^2 + 4) p_2 \right. \\
 &\quad \left. + (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) p_3 + t^3 p_4 \right]. \tag{8}
 \end{aligned}$$

Catmull-Rom curve Catmull-Rom 曲線は、すべての制御点を通り、かつ局所的な調整 (テンションパラメータ) によって形状を制御しやすい特徴をもつ。バリーとゴールドマンのピラミッド公式 (Barry and Goldman's pyramidal formulation) によると、再帰的な線形補間で定義できる。たとえば、4つの制御点 $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ から構成される3次 Catmull-Rom 曲線における補間点 $p(t)$ は、式 (9) のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \text{Lerp}\left(p_1, p_2; t+1\right), \\
 a_2 &= \text{Lerp}\left(p_2, p_3; t\right), \\
 a_3 &= \text{Lerp}\left(p_3, p_4; t-1\right), \\
 b_1 &= \text{Lerp}\left(a_1, a_2; \frac{t+1}{2}\right), \\
 b_2 &= \text{Lerp}\left(a_2, a_3; \frac{t}{2}\right), \\
 p_t &= \text{Lerp}\left(b_1, b_2; t\right).
 \end{aligned} \tag{9}$$

このアルゴリズムにおいても、Lerp を Slerp に置き換えることで、球面幾何学的に自然な球面 Catmull-Rom 曲線に拡張することができる (図 1(c))。なお、この計算過程は式 (10) の3次多項式と等価である。

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \frac{1}{2} \left[(-t^3 + 2t^2 - t) p_1 + (3t^3 - 5t^2 + 2) p_2 \right. \\
 &\quad \left. + (-3t^3 + 4t^2 + t) p_3 + (t^3 - t^2) p_4 \right]. \tag{10}
 \end{aligned}$$

3.2.2 加重平均 (Weighted Average)

いずれの補間曲線も、離散的に与えられた標本点列と連続的な基底関数との畳み込み演算によって構成されると考えられる。すなわち、複数の座標点 p_n と対応する基底関数の重み w_n が与えられると、ユークリッド空間では式 (11) のように加重平均を求められる。

$$p = \sum_n w_n p_n, \quad \sum_n w_n = 1. \tag{11}$$

このとき、幾何学的には点 p_n を頂点とする多角形の重心座標として解釈できる。しかし、球面上の多角形に同様の重心座標系を定義するには、ユークリッド空間の線形構造をそのまま用いることができない。そこで、さまざまな近似的あるいは準正確な手法が提案してきた。

mGlerp: Multiple Gnomonic Lerp 2本の単位ベクトルに対しては式 (2) の gnomonic Lerp が最も単純な球面補間手法であったように、複数本の単位ベクトルに対しても、

まずユークリッド空間で式(11)のように単純な加重平均を行い、その結果を心射図法により球面へ射影して正規化する方法が考えられる。たとえば、単位ベクトル列 $(\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n)$ と、重み (w_1, \dots, w_n) が与えられたとき、重心座標 \mathbf{v}_t は式(12)によって求められる。

$$\mathbf{v}_t = \frac{\mathbf{u}_t}{\|\mathbf{u}_t\|}, \quad \mathbf{u}_t = \sum_{k=1}^n w_k(t) \mathbf{v}_k. \quad (12)$$

このとき、各辺は大円に沿う性質を共有するが、パラメータ t に対する角速度が一定にならないため、球面幾何学的な意味での線形にはならない。これは、いわば擬似的な重心座標と解釈できる。

cSlerp: Chained Slerp 式(3)のSlerpは、2本の単位ベクトルに対しては理想的な球面線形補間である。これを順次数珠つなぎに適用して複数点の加重平均を定義する方法(chained Slerp)を考えてみる。たとえば、4本の単位ベクトル $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4\}$ とその重み $\{w_1, w_2, w_3, w_4\}$ が与えられたとき、重心座標 \mathbf{v}_t は式(13)によって求められる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_2 &= \text{Slerp}\left(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2; \frac{w_2}{w_1+w_2}\right), \\ \mathbf{u}_3 &= \text{Slerp}\left(\mathbf{u}_2, \mathbf{v}_3; \frac{w_3}{w_1+w_2+w_3}\right), \\ \mathbf{v}_t &= \text{Slerp}\left(\mathbf{u}_3, \mathbf{v}_4; \frac{w_4}{w_1+w_2+w_3+w_4}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

しかし、四元数の乗算が非可換であるように、Slerpも適用順序によって結果が変わってしまう。すなわち、式(14)のように非結合的(順序依存)である。

$$\begin{aligned} &\text{Slerp}\left(\text{Slerp}\left(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2; \frac{w_2}{w_1+w_2}\right), \mathbf{v}_3; \frac{w_3}{w_1+w_2+w_3}\right) \\ &\neq \text{Slerp}\left(\text{Slerp}\left(\mathbf{v}_3, \mathbf{v}_2; \frac{w_2}{w_3+w_2}\right), \mathbf{v}_1; \frac{w_1}{w_3+w_2+w_1}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

よって、適用順序を変えると最終結果が変化するため、正しい意味での多点加重平均にはならない。

Exp Map 4次元ベクトルとしての四元数は、一つの数として乗算を含むさまざまな演算を行える。特に、式(4)の累乗形式Slerpを拡張すると、対数空間への写像(ln)と逆写像(exp)を用いることで、以下のように多点加重平均を定義できそうに見える。たとえば、4つの四元数 $\{\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \mathbf{q}_4\}$ に対して、式(15)のように加重平均を定義してみる。

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_t &= \mathbf{q}_o \exp(w_1 \ln(\mathbf{q}_o^{-1} \mathbf{q}_1) + w_2 \ln(\mathbf{q}_o^{-1} \mathbf{q}_2) \\ &\quad + w_3 \ln(\mathbf{q}_o^{-1} \mathbf{q}_3) + w_4 \ln(\mathbf{q}_o^{-1} \mathbf{q}_4)). \end{aligned} \quad (15)$$

ここで \mathbf{q}_o は任意の四元数である。一見すると、非可換な四元数乗算を、可換な加算で置き換えられているように見える。しかし、実際には、射影する方向 \mathbf{q}_o に依存して結果が変わるために、あくまでも近似的な加重平均でしかない。なお、歪みを最小化するには、 \mathbf{q}_o を重心と一致させる必要がある。しかし、それは重心を計算する前に不可能なので、仮の重心をmGlerpなどを用いて事前に近似することが多い。

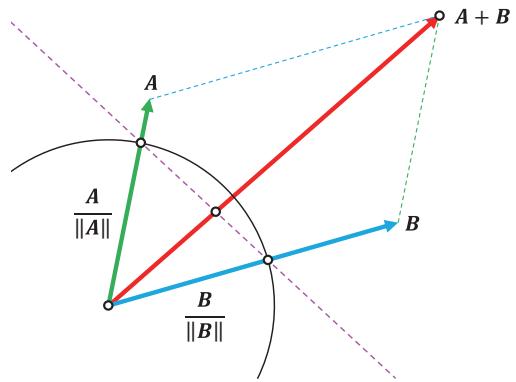


図2 球面上におけるベクトル加算の概念

Fig. 2 Concept of vector addition on a sphere

4. 提案手法

我々は、球面上の2点間における概念的な四則演算を定義することで、複数の球面座標に対する加重平均手法を導出し、球面曲線を基底関数から生成する手法を提案する。

4.1 球面座標の長さ

本手法の基本となる考え方は、ベクトルの加算は線形補間で定義できるという発想である。まず、球面 S^{n-1} 上の2点の位置 $(\mathbf{A}_S, \mathbf{B}_S)$ は、ユークリッド空間 \mathbb{R}^n における単位ベクトル $(\mathbf{A}_v, \mathbf{B}_v)$ として表される。そこで図2のように、あえてそれらに対して長さ $(\mathbf{A}_w, \mathbf{B}_w)$ の概念を与え、式(16)のようにユークリッド空間のベクトル (\mathbf{A}, \mathbf{B}) として扱う。

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{A}_w \mathbf{A}_v, \quad \mathbf{A}_w = \|\mathbf{A}\|, \\ \mathbf{B} &= \mathbf{B}_w \mathbf{B}_v, \quad \mathbf{B}_w = \|\mathbf{B}\|. \end{aligned} \quad (16)$$

このときのベクトル長は、球面座標における重みとして解釈できる。

4.2 球面座標の加算

上記のベクトル (\mathbf{A}, \mathbf{B}) について、その加算を式(17)のようにLerpを用いて再定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{A} + \mathbf{B} &= \mathbf{A}_w \mathbf{A}_v + \mathbf{B}_w \mathbf{B}_v \\ &= (\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w) \frac{\mathbf{A}_w \mathbf{A}_v + \mathbf{B}_w \mathbf{B}_v}{\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w} \\ &= (\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w) \left(\frac{\mathbf{A}_w}{\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w} \mathbf{A}_v + \frac{\mathbf{B}_w}{\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w} \mathbf{B}_v \right) \\ &= (\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w) \text{Lerp}\left(\mathbf{A}_v, \mathbf{B}_v; \frac{\mathbf{B}_w}{\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w}\right). \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、LerpをSlerpに置き換えると、ユークリッド幾何学からの自然な拡張として、球面幾何学上の点 $(\mathbf{A}_S, \mathbf{B}_S)$ の加算を式(18)のように定義できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_S + \mathbf{B}_S &= (\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w) \text{Slerp}\left(\mathbf{A}_v, \mathbf{B}_v; \frac{\mathbf{B}_w}{\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w}\right). \end{aligned} \quad (18)$$

4.3 球面座標の四則演算

球面座標 \mathbf{S} に対して概念上のベクトル長を重みとして導入し、単位ベクトルとの組 $(\mathbf{S}_w, \mathbf{S}_v)$ として扱うことで、球面座標の四則演算を定義できる。

4.3.1 加算

Slerp で用いていた媒介変数 t を、球面座標の重みに置き換えることで、式 (19) のように球面座標 $(\mathbf{A}_S, \mathbf{B}_S)$ の加算を定義する。

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_S + \mathbf{B}_S &= \mathbf{C}_S = (\mathbf{C}_w, \mathbf{C}_v), \\ \mathbf{C}_w &= \mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w, \\ \mathbf{C}_v &= \frac{\sin\left(\frac{\mathbf{A}_w}{\mathbf{C}_w} \theta\right)}{\sin(\theta)} \mathbf{A}_v + \frac{\sin\left(\frac{\mathbf{B}_w}{\mathbf{C}_w} \theta\right)}{\sin(\theta)} \mathbf{B}_v, \\ \theta &= \arccos(\mathbf{A}_v \cdot \mathbf{B}_v).\end{aligned}\quad (19)$$

4.3.2 減算

式 (19) の加算から、式 (20) のように減算も定義できる。

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_S - \mathbf{B}_S &= \mathbf{C}_S = (\mathbf{C}_w, \mathbf{C}_v), \\ \mathbf{C}_w &= \mathbf{A}_w - \mathbf{B}_w, \\ \mathbf{C}_v &= \frac{\sin\left(\frac{\mathbf{A}_w}{\mathbf{C}_w} \theta\right)}{\sin(\theta)} \mathbf{A}_v - \frac{\sin\left(\frac{\mathbf{B}_w}{\mathbf{C}_w} \theta\right)}{\sin(\theta)} \mathbf{B}_v, \\ \theta &= \arccos(\mathbf{A}_v \cdot \mathbf{B}_v).\end{aligned}\quad (20)$$

4.3.3 乗算

四元数以外の一般的なベクトル同士の乗算は定義できないため、本論文ではスカラ値 B との乗算のみを式 (21) のように定義する。

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_S \times B &= \mathbf{C}_S = (\mathbf{C}_w, \mathbf{C}_v), \\ \mathbf{C}_w &= \mathbf{A}_w \times B, \quad \mathbf{C}_v = \mathbf{A}_v.\end{aligned}\quad (21)$$

4.3.4 除算

同様に、四元数以外の一般的なベクトル同士の除算は定義(逆数との乗算)できないため、ここではスカラー値での除算のみを式 (22) のように定義する。

$$\begin{aligned}\frac{\mathbf{A}_S}{B} &= \mathbf{C}_S = (\mathbf{C}_w, \mathbf{C}_v), \\ \mathbf{C}_w &= \frac{\mathbf{A}_w}{B}, \quad \mathbf{C}_v = \mathbf{A}_v.\end{aligned}\quad (22)$$

4.4 球面座標の加重平均

球面座標の四則演算を定義できたとしても、単に複数の座標を足し合わせるだけでは chained Slerp と等価になってしまふ。そこで本手法では、球面幾何学的に厳密な意味で正しい加算手法を提案する。まず前提とするのは、3.2.1 項で述べたように、再帰的な線形補間によって曲線が生成できるという事実である。これは、言い換えれば、すでに事実上の加

重平均が実現されていることを意味する。ここから、再帰的な線形補間という行為自体が、球面幾何学における加算の根源的な操作とみなせる。そして、球面線形補間が座標回転の性質をもつため、そもそも球面座標の加算は可換ではなく、加算に順序があるという解釈も自然なものとなる。

ここで、再帰的な線形補間を、重みをもつ複数の球面座標に対する再帰的な加算へと置き換えることを考える。たとえば、4つの球面座標 $(\mathbf{A}_S, \mathbf{B}_S, \mathbf{C}_S, \mathbf{D}_S)$ を加算する場合を想定する。再帰的な手順であっても、最終的に求めたいのは4つの加算結果であるから、最終的な重みは $\mathbf{A}_w + \mathbf{B}_w + \mathbf{C}_w + \mathbf{D}_w$ に等しくなるはずである。しかし、単純に再帰的加算を実行すると、図 3(a) に示すように重みに偏りが生じる。

この偏りは、再帰のたびに加算が重複することに起因するため、偏りを除去するためには、二つの方法が考えられる。一つは、偏った係数の分布が二項係数と等しいことに注目し、加算前のベクトルに二項係数の逆数を重みとして与える方法 (type-1, 図 3(b)), もう一つは、両端を除く内部のベクトルが重複して加算されることに注目し、内部のベクトルに対してのみ重みを半分に除算する処理を加える方法 (type-2, 図 3(c)) である。どちらの方法でも、最終的な重みの偏りが解消され、期待される真の総和が得られる。我々はこの手法を Spherical Polygon Linear Interpolation (PolySlerp) と名付ける。上記の 2 種類の加算方式に応じて PolySlerp-1 / PolySlerp-2 と区別する。

5. 評価

本手法を含めた様々な手法を用いて単位四元数曲線を生成し、その比較を行った(以降、特段の注釈がない限り、球面曲線についてのみ言及する)。単位四元数は 4 次元ベクトルであるが、3 次元空間での座標回転として解釈できる。4 色に塗り分けた球体を単位球面 S^2 に沿って回転させることで、単位四元数を可視化した(図 4)。ランダムな単位四元数を曲線でつなぐと、球面 S^2 上に可視化した際に球体全域を取り巻く複雑な曲線(図 4(a))が生成され、曲線の評価が困難となる。そこで、隣接する単位四元数のなす角を最小化するように最適化を行い、曲線の蛇行を最小限に抑えた(図 4(b))。そのうえであえて単位四元数に規則的な捻れ θ を加え、蛇行させることで曲線の特徴を強調する(図 4(c))。なお、単位四元数列に Slerp を適用したとしても、それはあくまでも超球面 S^3 上の最短距離(大円)であり、球面 S^2 上の Slerp とは一致しない点には注意が必要である。

5.1 PolySlerp による球面曲線

PolySlerp を用いて、基底関数から直接、各種曲線を生成した(図 5)。Bézier 曲線や B-spline 曲線はもとより、基底関数に負の値が含まれる Catmull-Rom 曲線においても、PolySlerp は球面上の加重平均として正常に動作した。

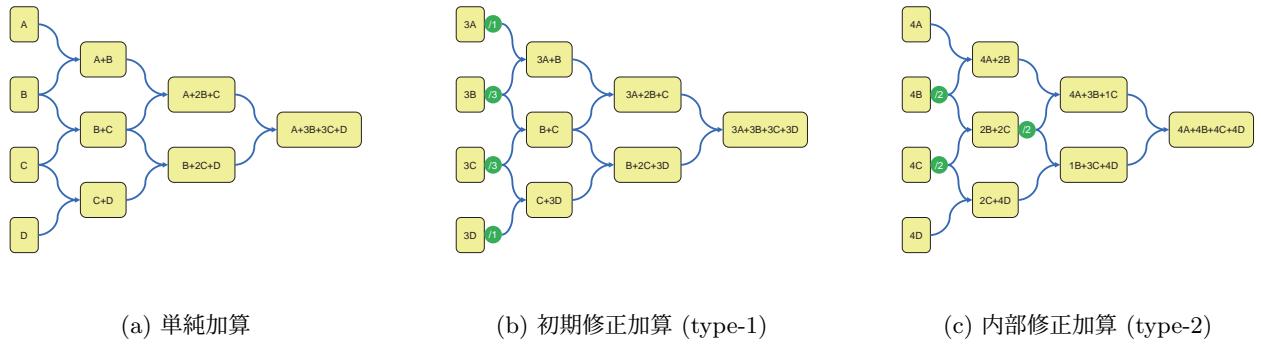


図 3 再帰的加算
Fig. 3 Recursive summation

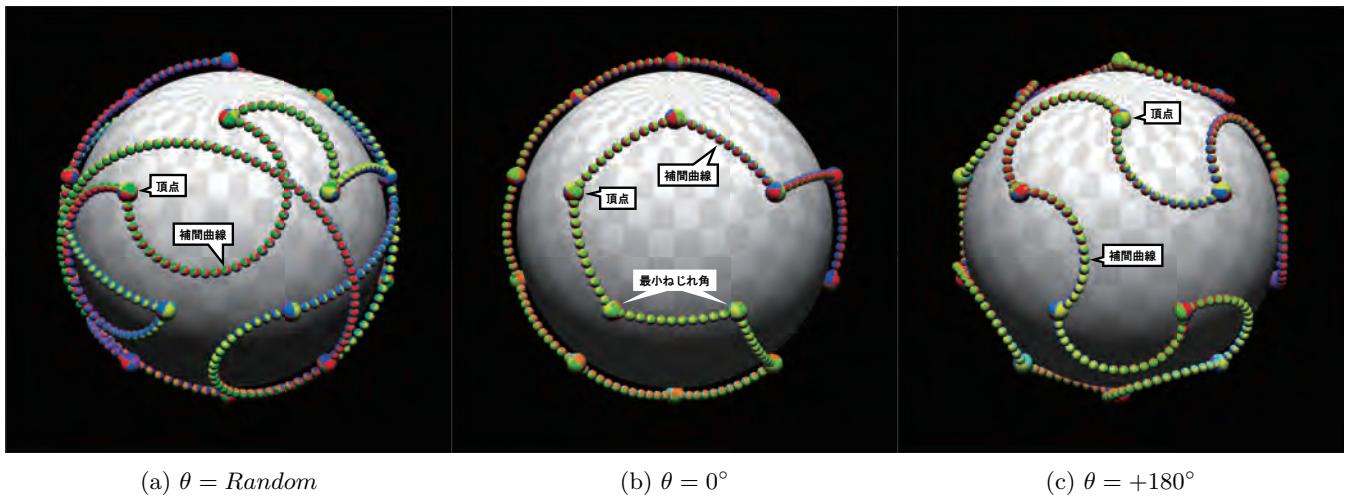


図 4 単位四元数の可視化
Fig. 4 Visualization of unit quaternions

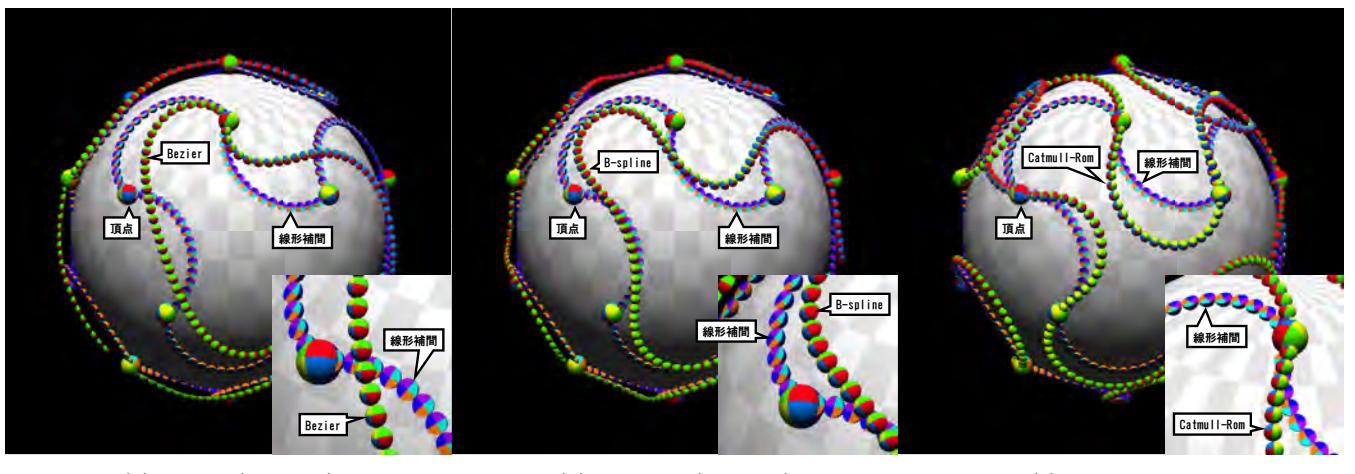


図 5 PolySlerp-1 による四元数曲線 (下層: Slerp)
Fig. 5 Quaternion curve by PolySlerp-1 (bottom layer: Slerp)

5.2 再帰的線形補間と基底関数

RecSlerp によって生成された球面幾何学的に正しい曲線と、基底関数に基づく加重平均によって生成された曲線を比較する。それぞれの手法で生成された補間点のズレ（誤差）を角度として図示した（図 6）。3種類の曲線において、PolySlerp

が最も誤差が少ないことが実証された。特に PolySlerp-1 を用いた Bézier 曲線に関しては、誤差がゼロになる。これは再帰的加算 (type-1) の概念が、ド・カステリョのアルゴリズムと数学的に等価であることを示している。PolySlerp-2 に関しても、PolySlerp-1 に匹敵する低誤差を実現しているた

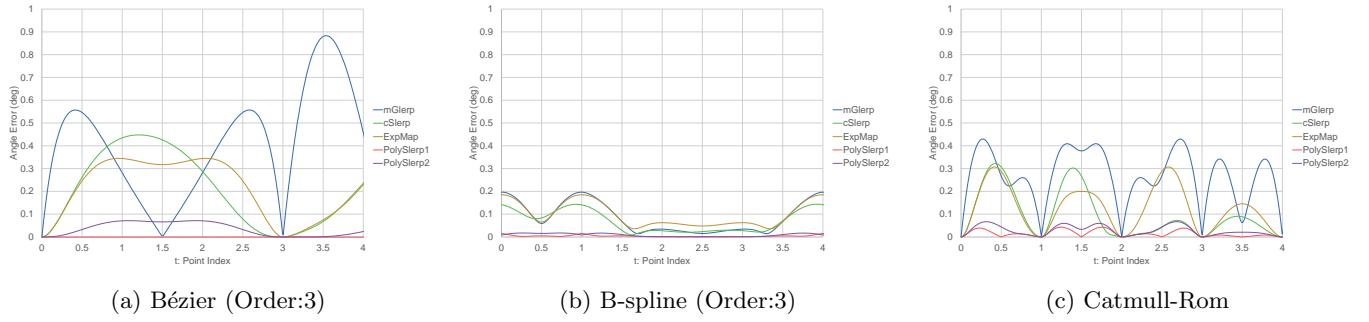


図 6 異なる手法による四元数曲線の誤差

Fig. 6 Errors of quaternion curves by different methods

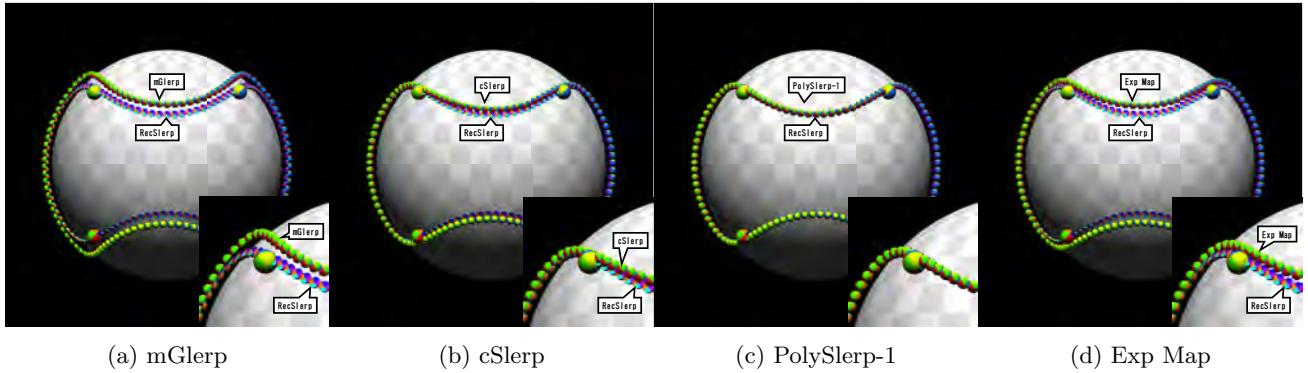


図 7 異なる手法による B-spline 曲線 (下層: RecSlerp)

Fig. 7 B-spline curves by different methods (bottom layer: RecSlerp)

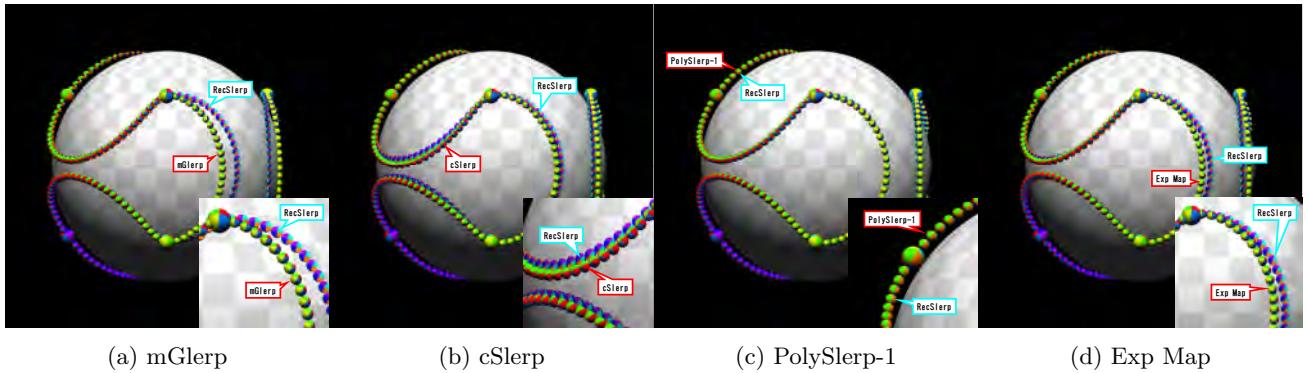


図 8 異なる手法による Catmull-Rom 曲線 (下層: RecSlerp)

Fig. 8 Catmull-Rom curves by different methods (bottom layer: RecSlerp)

め, 再帰的加算 (type-2) の概念も, 近似手法として妥当なことが分かる. 視覚的な比較においても, B-spline 曲線 (図 7) および Catmull-Rom 曲線 (図 8) において, 顕著な差異が観察された. PolySlerp のみ両者がほぼ一致し, 球面幾何学的に正しい加重平均が実現されていることが実証された. B-spline 曲線および Catmull-Rom 曲線において誤差が生じている原因は, 一つの多項式で定義されている Bézier 曲線とは異なり, 両者とも区分多項式で定義されていることに起因すると考えられる.

5.3 Lanczos 球面補間

再帰的線形補間による生成アルゴリズムが存在せず, 多項式でもない基底関数を備える Lanczos 補間関数を用いて四元数曲線を生成した (図 9). ユークリッド空間での Lanczos

基底関数は, 式 (23) のように定義される.

$$\text{Lanczos}_a(x) = \begin{cases} \text{sinc}(x) \text{ sinc}\left(\frac{x}{a}\right), & |x| < a, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (23)$$

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}, & x \neq 0, \\ 1, & x = 0. \end{cases}$$

Lanczos 曲線は, 再帰的線形補間によって生成できるアルゴリズムが存在しないので, 正しい曲線を基準とした誤差評価ができない. そこで, SIGGRAPH 2007 において画期的なスキーリング手法を提案した論文¹²⁾をはじめとして, キャラクターアニメーションの分野でも事実上の標準として利用

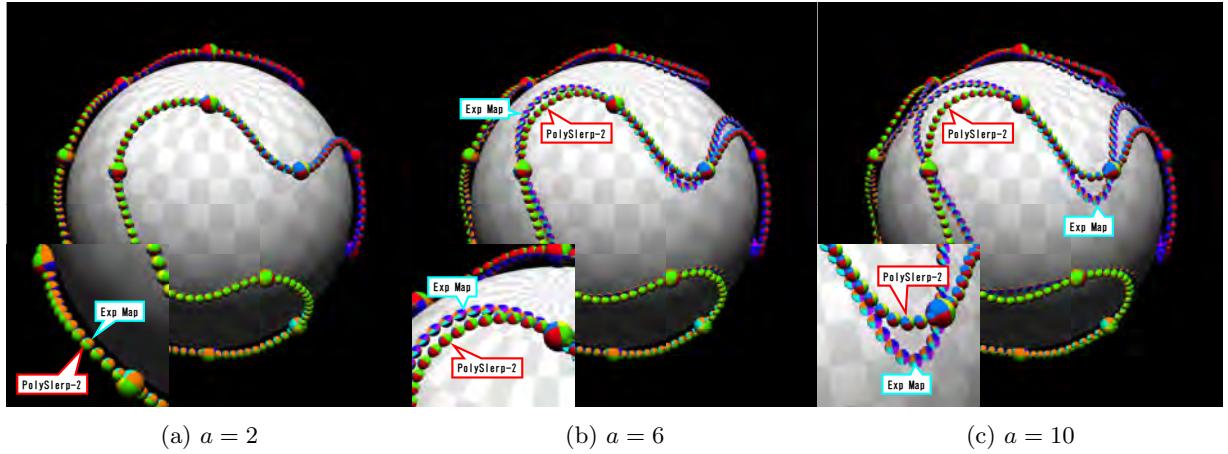


図 9 PolySlerp-2 (上層) と Exp Map (下層) による Lanczos 曲線
Fig. 9 Lanczos curves by PolySlerp-2 (top layer) and Exp Map (bottom layer)

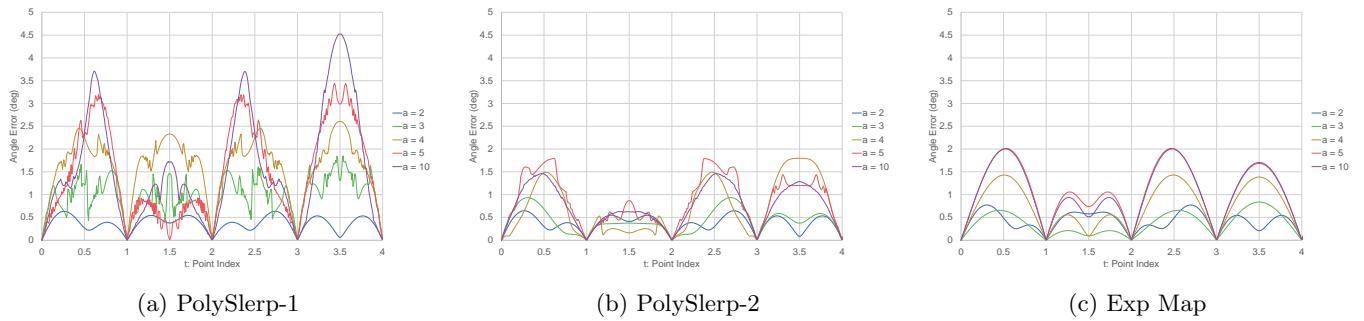


図 10 異なる手法による Lanczos 曲線の誤差
Fig. 10 Errors of Lanczos curves by different methods

されている線形混合 (Linear Blending), つまり mGlerp によって基準曲線を生成し, それとの誤差を評価した (図 10)。

すると PolySlerp において, 不連続な誤差が確認された。特に PolySlerp-1 においての誤差が大きく曲線として破綻している。これは, Lanczos 関数が超越関数であることに起因していると考えられる。我々の提案する再帰的加算は, 代数的な処理であるので, 非多項式とは相性が悪い。特に再帰的加算 (type-1) においては, 重みを二項係数で除算する過程で重みの分散が大きくなり, 数値的不安定性を招いたと考えられる。実際, Lanczos 関数の幅 a を大きくするほど, 誤差の不連続性は減少している。PolySlerp-2 に関しては, 再帰の過程で分散して重複加算を除去するので, 数値的安定性が高い。

視覚的な比較 (図 9) においても, PolySlerp-2 のほうが蛇行の少ない曲線が得られ, Exp Map のほうにギブス現象が顕著に現れた。

PolySlerp-2 を用いても, 小さいウィンドウ幅の $a = 3, 4, 5$ 付近において曲線の破綻が確認された (図 11)。しかし $a > 6$ においては回復傾向を示しており, このエラーは畳み込み演算の精度に起因していると考えられる。

結論として, 数学的に最も正しいのは PolySlerp-1 であるが, 正負を繰り返すような複雑な重みの場合は, 数値的安定性に欠けてしまう。そこで, 少し誤差は大きくなるが, 数値

的安定性の高い PolySlerp-2 という手法も, 実践的な妥協案となり得る。

5.4 計算コスト

本論文が提案する PolySlerp は, 単一の代数式ではなく, 再帰的な線形補間を繰り返すので, 従来手法と比べると計算コストが高い。 n 個の点からなる制御多角形に対して, $n(n-1)/2$ 回, $\mathcal{O}(n^2)$ の Slerp 演算が必要となる。三角関数も使わない Glerp とは比べるまでもないが, 偏りのある Slerp でも, $(n-1)$ 回, $\mathcal{O}(n)$ の Slerp で済む。Exp Map でも, 四元数の対数に三角関数を用いるので, Slerp と同程度の計算コストが $\mathcal{O}(n)$ で生じる。ゆえに PolySlerp は, リアルタイム性が求められる分野では敬遠されるかもしれない。しかしながら, 基本的に基底関数は局所台をもつため, 計算コストの上昇はそれほど大きな割合を占めない。

6. 結 論

本研究では, 球面上の単位ベクトルに概念的な長さを導入することで, 非ユークリッド空間である球面上の四則演算を実現した。さらに, 従来の再帰的線形補間による曲線生成の考え方と, 本研究の球面四則演算を組み合わせることにより, 球面上での加重平均 (球面重心座標系) を定義できることを示した。これは, あらゆる既存の曲線生成手法を球面へ拡張可能であることを意味し, 実際に PolySlerp によって生成さ

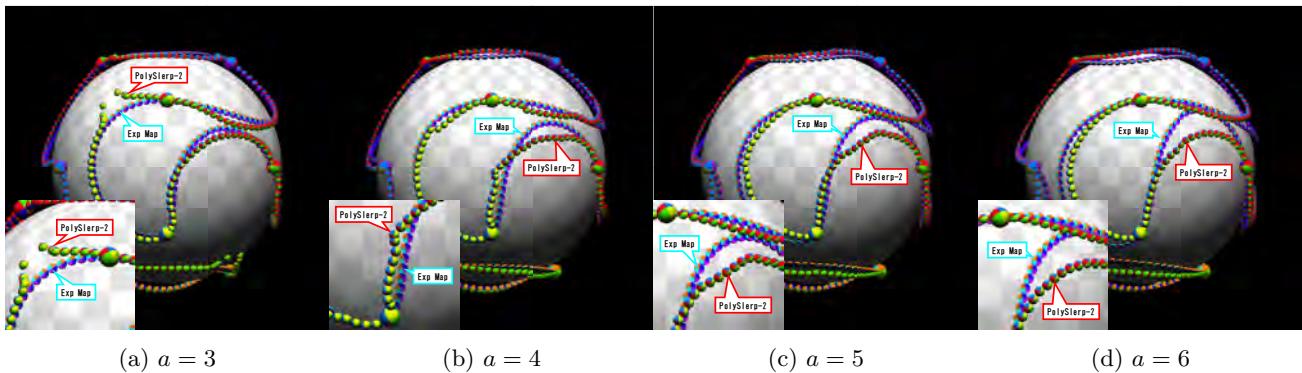


図 11 PolySlerp-2 による Lanczos 曲線のエラー (下層: Exp Map)
Fig. 11 Error of Lanczos curve by PolySlerp-2 (bottom layer: Exp Map)

れた球面曲線が、従来の再帰的線形補間による曲線とも一致することを確認した。この結果は、球面加重平均の正当性を裏付けるものであり、球面曲線の生成手法としての範疇を超える、球面における信号処理体系の確立に資するものである。

ゆえに PolySlerp は、CG 分野のみならず、回転を扱うあらゆる分野へ応用可能である。軌道修正や複数の姿勢指令点を経由する経路生成に適しているため、ロボットアームや人工衛星の姿勢制御などにおいて、角速度や角加速度の連続性を確保するうえで有利である。さらに、任意次元の単位ベクトルに適用できるため、センサー情報の統合や多自由度系の姿勢制御にも応用可能であり、制御系設計の柔軟性を高める。

一方で、特定の状況下では PolySlerp の不完全さも明らかとなった。これは、幾何学的アルゴリズムに依存する PolySlerp 特有の脆弱性とも考えられるが、そもそもユークリッド空間の畳み込み積分という概念が球面上でも普遍的に成り立つかについても、依然として疑問が残る。いずれにせよ、区分多項式や超越関数への対応を含め、球面幾何学に基づく信号処理体系のさらなる研究が必要である。

謝 辞

本研究の一部は、科研費基盤研究 (A) 21H04916 の支援により実施された。

参考文献

- 1) K. Shoemake: "Animating Rotation with Quaternion Curves", Proceedings of the 12th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '85), San Francisco, CA, ACM, New York, pp. 245–254 (1985).
- 2) K. Shoemake: "Quaternion Calculus and Fast Animation", Proceedings of SIGGRAPH 1987, Course Notes No. 10: Computer Animation: 3-D Motion Specification and Control, Anaheim, CA, ACM, New York, pp. 101–121 (1987).
- 3) A. H. Barr, B. Currin, S. Gabriel, J. F. Hughes: "Smooth Interpolation of Orientations with Angular Velocity Constraints Using Quaternions", Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '92), Chicago, IL, ACM, New York, pp. 313–320 (1992).
- 4) W. Wang, B. Joe: "Orientation Interpolation in Quaternion Space Using Spherical Biarcs", Proceedings of Graphics Inter-
- face '93, Toronto, Canada, Canadian Human-Computer Communications Society, pp. 24–32 (1993).
- 5) M.-J. Kim, M.-S. Kim, S. Y. Shin: "A General Construction Scheme for Unit Quaternion Curves with Simple High Order Derivatives", Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '95), Los Angeles, CA, ACM, New York, pp. 369–376 (1995).
- 6) M.-J. Kim, M.-S. Kim, S. Y. Shin: "A C²-Continuous B-spline Quaternion Curve Interpolating a Given Sequence of Solid Orientations", Proceedings of Computer Animation '95, Geneva, Switzerland, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, pp. 72–81 (1995).
- 7) R. Ramamoorthi, A. H. Barr: "Fast Construction of Accurate Quaternion Splines", Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '97), Los Angeles, CA, ACM, New York, pp. 287–292 (1997).
- 8) E. B. Dam, M. Koch, M. Lillholm: "Quaternions, Interpolation and Animation", Technical Report DIKU-TR-98/5, Dept. of Computer Science, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark (1998).
- 9) D. Eberly: "Quaternion Algebra and Spherical Splines", Geometric Tools, Redmond, WA, pp. 1–17 (1999).
- 10) S. R. Buss, J. P. Fillmore: "Spherical Averages and Applications to Spherical Splines and Interpolation", ACM Transactions on Graphics, Vol. 20, No. 2, ACM, New York, pp. 95–126 (2001).
- 11) W. Ge, Z. Huang, G. Wang: "Interpolating Solid Orientations with a C²-Continuous B-Spline Quaternion Curve", Proceedings of the 2nd International Conference on E-Learning and Games (Edutainment 2007), Hong Kong, Springer, Berlin Heidelberg, pp. 272–283 (2007).
- 12) L. Kavan, S. Collins, J. Žára, C. O'Sullivan: "Skinning with Dual Quaternions", Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3D '07), ACM Press, New York, pp. 39–46 (2007).
- 13) W. Boehm: "On Cubics: A Survey", Computer Graphics and Image Processing, Vol. 19, No. 3, Academic Press, New York, pp. 201–226 (1982).

(2025年4月17日受付)

(2025年9月18日再受付)



中山 雅紀 (正会員)

千葉県市川市のお寺「玉泉山 安国院」の住職を勤めるとともに、CG アートの制作および普及を行う会社「LUXOPHIA」の CEO 兼アーティストとして活動している。2002 年および 2004 年に、慶應義塾大学で学士（工学）および修士（工学）を取得。専門は、フォトリアルレンダリング、自由曲面モデリング、球面幾何に基づくデータ処理、ステレオグラム、3D アパレル設計、AI デザイン設計など。情報処理学会（IPSJ）会員。



藤代 一成 (名誉会員)

東京大学、筑波大学、お茶の水女子大学、東北大学を経て、2009 年より慶應義塾大学理工学部情報工学科教授。1988 年理学博士（東京大学）。41 年間、CG・可視化や知的環境メディアに関する研究に従事。本会では会長、副会長、理事、VC 研究委員会委員長、評議員、代議員等を歴任。本誌最優秀論文賞、優秀論文賞 2 回受賞。日本工学会、情報処理学会フェロー、ACM・IEEE シニア会員、IEEE Visualization Academy 会員。現在、日本学術会議連携会員。

写真を入力とする2次元アバター用衣装制作支援

坂 本 夏 海[†] 五十嵐 悠 紀^{†, ††}(正会員)

[†]お茶の水女子大学, ^{††}東京大学

2D Avatar Costume Production Using Photographs

Natsumi SAKAMOTO[†], Yuki IGARASHI^{†, ††}(Member)

[†]Ochanomizu University, ^{††}The University of Tokyo

〈あらまし〉 近年、アバターを用いた仮想空間内のコミュニケーションがさまざまな分野で活用されている。アバターは仮想空間においてユーザによる自己表現手法であり、アバターに着せる衣装も自己表現のひとつである。本研究では、絵心や専門的な知識を持たないユーザでも容易にアバターに着せたい衣装を着せられるよう支援するシステムを提案する。写真を入力とし、イラスト調へと変換してアバターに着せる2つの手法を実装した2Dアバター用衣装制作支援システムを提案する。また、画像生成を用いた衣装制作による2次元アバター用衣装制作支援システムの評価実験を行った。その結果、ユーザが衣装を描くという従来手法よりも極めて短い作業時間でより優れた衣装を作成できることが示され、提案システムの有用性が確認された。

キーワード：アバター、衣服、デザイン、製作支援

〈Summary〉 In recent years, avatars have been used for communication in virtual spaces in various fields. Avatars are a method of self-expression by users in virtual spaces, and costumes for avatars are another form of self-expression. In this study, we propose a system that supports users who do not have a drawing ability or specialized knowledge to easily dress their avatars in costumes they want to wear. We propose a 2D avatar costume creation support system that implements two methods: one is to take a photo as input and convert it into an illustration style, and the other is to dress the avatar in the illustration style. We also conducted an evaluation experiment of the costume creation support system for 2D avatars by creating costumes using image generation. As a result, it was shown that the proposed system can produce better costumes in a very short time than the conventional method in which the user draws the costume, and the usefulness of the proposed system was confirmed.

Keywords: avatar, costume, design, production support

1. はじめに

近年、技術の進化に伴いコミュニケーションの手段は多様化している。従来の電話や対面での会話、電子メールに加えインターネットを利用したオンラインコミュニケーションが広く普及している。なかでも動画配信プラットフォームやSNSにおいては、ユーザがアニメ調の2次元(2D)アバターを通じて交流するスタイルが広がっており、さまざまな分野で活用されている^{1), 2)}。アバターは顔つきや身長といった身体的特徴だけでなく、衣装も自己表現の大きな要素である。我々が衣服を通じて自身の個性や嗜好を表現しているのと同様に、2Dアバターにおいても衣装の選択が重要な役割を果たす。

アバターに望んだ衣装を着せたい場合、おもに2つの方法

が挙げられる。1つ目は事前にデザインされた衣装を選択および購入する方法で、ユーザは多種多様な衣装の中から自身の好みに合ったものを簡単に入手することが可能である。しかし、アバターの体型は個人によって異なるため、入手した衣装がアバターに合わなかった場合は体格に合わせる作業(形状調整・変形・補正・テクスチャ統合等)を行う必要があり、たとえ2Dであっても専門的な知識が求められるため、製作にはおよそ1~数時間を要する。2つ目は、ユーザが自分でデザインを行う方法である。この方法では、ユーザは絵を描きモデリングを行うことで所持しているアバターに合わせて自身の好みを反映させた衣装を入手することが出来る。しかし、自分で一から制作を行う必要がある。このように従来手

法では、絵心や専門的な知識が求められるため、アバターの衣装はアバターを介した自己表現のひとつであるにもかかわらず、好みのものを自身のアバターに着せることは容易とは言えないという課題が存在する。

本論文では前述の課題を解決するための一手段として、写真を用いた2Dアバター用衣装制作手法を提案する。本論文で対象とするアバターはアニメ調のアバターとする。本研究は写真から衣装画像を制作することを目的としており、その第一段階として2Dアバターを対象としたアバター用衣装制作システムの開発を行った。提案システムは入力画像となる衣服の写真画像をイラスト調に変換することで2Dアバター用衣装を複数作成し、ユーザに提示する。また本論文では写真画像をイラスト調に変換する手法として、画像編集を用いた衣装画像製作手法と画像生成を用いた衣装画像製作手法の2つの手法を提案する。いずれの提案手法も入力画像として写真を用いることで、従来では必要だった絵心や専門的な知識を必要としない2Dアバター衣装制作システムを実現し、提案手法を用いた2Dアバター用衣装制作支援システムを開発した。提案システム内で画像生成と画像選択および2Dアバターへの着用まででき、老若男女問わず簡単に使えるユーザインターフェース設計とした。評価実験の結果、ユーザが衣装を描くという従来手法よりも極めて短い作業時間でより優れた衣装を制作できることが示され、提案システムの有用性が確認された。

2. 関連研究

2.1 画像編集や2Dキャラクタ操作のためのユーザインターフェースに関する研究

画像編集分野において、ユーザが直感的な操作で高品質な編集結果を得られるようにするためのインターフェースが多数提案されてきた。Lazy Snapping⁵⁾はユーザが入力する少数のストロークから前景と背景をインタラクティブに分離できる手法である。また、Soft Scissors⁶⁾はストローク入力で半透明境界の分割を容易にし、Levinらの手法⁷⁾では、ユーザが前景・背景を指定することでより精細な切り抜きを実現している。また、Igarashiらは画像に対してユーザが少数のハンドルを指やマウスなどで指定するだけで、自然な形状変形をリアルタイムに実現するアルゴリズムを提案した⁸⁾。

また、2Dアバターのポージングを編集するためのインターフェースとして、Pose2Pose⁹⁾では2Dアバターのためのポージング生成において、入力となったビデオからポーズのクラスターを表示して、個性を捉えた代表的なポーズをシステムが提示しそれを選択するインターフェースが提供されている。

これらの研究は、専門的な知識を持たないユーザでも効率的に望んだ結果を得られるユーザインターフェース設計となっている。一方で、本論文で対象としているような2Dアバターの衣服デザインのための研究およびユーザインターフェースの提案はこれまで行われていない。近年では、Stable Diffusion

をはじめとする生成AIの普及に伴い、様々なツールが登場している。例えば、AIを活用した画像生成に特化してノードベースでデザインすることができるComfyUI¹⁰⁾や機械学習モデルを操作するためのWeb UIを簡単に作成できるPythonライブラリGradio¹¹⁾などがある。これらを利用することで、写真などの既存画像を入力として与えて新しい画像を生成・編集することも容易となった。しかし、これらのシステムは衣服デザインに特化しているわけではないので、画像生成パイプラインをデザインし、パラメータ操作などを行う必要があり、初心者が直感的にデザインできるとは言い難い。

本研究では2Dアバター用衣装制作支援として、ユーザの専門的な知識を必要とせず、好みの衣装画像をデザイン可能とするために初心者が使いやすいインターフェース環境を提供する。

2.2 単一画像を用いた衣服データの生成に関する研究

上原らは衣服の写真画像から衣服の頂点座標を取得したのちに、前面と背面のメッシュを作成し結合することで衣服の3Dモデルを生成し、特殊な装置や型紙情報を必要としない单一画像を用いた仮想試着手法を提案した¹²⁾。また、Hanらは粗い合成画像から徐々に詳細を反映させていくことで3次元情報を一切持たない写真画像から画像ベースの仮想試着ネットワーク生成する手法を提案した¹³⁾。Yangらは、衣服の写真画像からパラメータ推定や布シミュレーションなどを組み合わせて用いることで、しわや折り目などの詳細な部分まで復元された3Dモデルを生成し、仮想試着への応用を提案した¹⁴⁾。Tangoらはコスプレ用衣装画像の生成を目的とし、イラストからキャラクターが着用している衣装を抽出後、GANを用いて既存の服を組み合わせた衣服画像を生成した¹⁵⁾。Liuらは衣服の写真画像と仮想試着をさせたい人物の画像の2つを入力とし、衣服領域のセグメンテーションや骨格推定を用いることで、人物のポーズに合わせて衣服の画像を合成させる手法を提案した¹⁷⁾。

このように单一画像を用いて衣服データを生成する研究や生成した衣服データを人物の写真画像に合成する研究は多くあるが、これらは仮想試着やコスプレ用など実際に人間が身につけることを最終目的とした研究であり、2Dアバターに生成した衣服データを着せることを目的として行われている研究は未だ存在しない。

2.3 写真画像のスタイル変換に関する研究

ChenらはGANを用いて写真をカートゥーンスタイルに変換させるフレームワーク、CartoonGANを提案し、実世界の風景の写真をより高品質なカートゥーンスタイルへと変換させることを可能にした¹⁸⁾。また、Gatysらは自然画像に対してCNNを用いることで画像の高次情報を明示化させ、著名な画家のアートワークに似たスタイルへと変換させる手法を提案した¹⁹⁾。Johnsonらは畳み込みネットワークと損失関数の最適化を組み合わせることで、写真画像のスタイルを

任意のイラストのスタイルに変換する手法を提案した²⁰⁾。

このように、写真画像に対してスタイル変換を行い、カートゥーンスタイルなどのイラスト調に変換する研究は多く行われているが、アバター用衣装を目的とした衣服の写真画像についてのスタイル変換の研究は行われていない。

2.4 アバター制作システムに関する研究

Isozaki らは事前に用意されている豊富な 3D モデルを組み合わせ、テクスチャをユーザが描くことで従来手法よりも簡単に自由度の高い 3D アバターを製作できるシステムを開発した²¹⁾。また、Ma らはアバターによる自己表現のひとつとして、義手や義足、車椅子などが選択できるアバター制作システムを提案した²²⁾。西奥らは衣装の 3D モデルの頂点をユーザが自由に配置することで、様々な体型のアバターに合わせたシャツのモデリングシステムを提案した¹⁶⁾。

このように、アバター製作システムについては多くの研究がされているが、アバターの衣装デザインに特化した研究や 2D アバターを対象としたアバター制作に関する研究は行われていない。

3. 提案システムについて

提案システムは写真を入力とし、入力画像をもとに制作した衣装の画像とその衣装を着用したアバター画像の 2 枚を出力する。入力画像をイラスト調に変化させるために、2 つの手法を用意した。1 つ目は画像編集を用いた衣装制作手法であり、4 章で述べる。2 つ目は画像生成を用いた衣装制作手法であり、5 章で述べる。また、評価実験は後者（5 章の手法）を用いて行った。提案システムはフロントエンドに Java を、バックエンドに Python を用いて開発を行った。

4. 提案手法 1：画像編集を用いた衣装制作手法

本手法では、まずアバターに着せたい衣服の写真を選択または撮影する。その後、写真画像に対して k-means 法や ImageQuilting 手法²³⁾を用いてイラスト調に変換し、衣装候補を 3 つを生成して提示する。リアルタイム性と実装の容易さを重視し、事前学習不要かつ安定して動作する Image Quilting を採用した。ユーザは気に入ったものを 1 つ選択するか、別途用意したテクスチャを選択し使用することで、アバターに着せる衣装画像を決定する。最後にアバターと衣装画像を重ねて確認をしながらアバターに合うようにサイズを調整して着せ替えを行う。出力画像は生成した衣装のみの画像と生成した衣装を着用したアバターの画像の 2 つである。

4.1 入力画像について

まずははじめに、ユーザはアバターに着せたい衣服の写真を撮影または選択を行う。撮影を行う場合、ユーザはアバターに合わせたポーズをとる必要がある。撮影画面上にはアバターが半透明で表示される（図 1）。スペースキーを押すと画面上に 10 秒のカウントダウンが表示され、ユーザは 10 秒以内に



図 1 アバターと入力画像の撮影の様子

Fig. 1 Example of avatar and taking input images

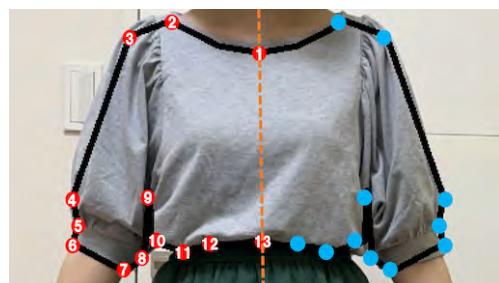


図 2 左右対称に選択していくモード

Fig. 2 The mode of the symmetrical selection technique

ポーズを取り撮影を行う。入力画像を選択する場合は、任意のフォルダから画像を選択する。

4.2 衣装にしたい領域の抽出

入力画像から衣装として再現したい領域を抽出する必要がある。例えば、トップスとスカートが両方写るように撮影された写真画像に対してトップスのみを再現したい場合は、トップスのみを入力画像から抽出する必要がある。本手法ではユーザが抽出したい領域の頂点を選択していくことで抽出したい領域を選択してマスク画像を作成し、入力画像から該当領域を抽出する。抽出工程で抽出した形がそのまま衣装の形となるため、衣服の頂点を選択していく際には入力画像に重ねてアバターが半透明に表示されており、ユーザはアバターの体格を確認しながらそれに沿うような衣装の形で抽出することが可能である。

該当領域の抽出の際にはユーザは 2 つのモードから選択可能である。1 つ目のモードは左右対称になるように領域を抽出する左右対称モードである。このモードでは、ユーザが選択した頂点に対して画像の中心を通る線について線対象な位置にも頂点が生成される（図 2）。図 2において、赤丸はユーザがクリックする頂点、青丸は自動でプロットされる頂点、橙色の点線は入力画像の中心線を示す。また、赤丸に付与した番号はユーザが選択する順を示している。ユーザは左半身のみを襟元から裾まで選択することで抽出したい領域を生成することができ、領域抽出に関する作業量が大幅に減少する。このモードは左右対称な形の衣服に有用である。

2 つ目のモードはユーザが全ての頂点を選択していくモードで、作業量は多くなるが左右対称ではない複雑な形の衣服



図3 頂点を全選択するモード
Fig. 3 The mode of selecting all vertices

を抽出することが可能となる(図3)。図3において、赤丸はユーザが選択する頂点、赤丸に付与した番号は選択する順を示す。頂点数はユーザが任意に指定可能であり、図3では一例として24点を指定した例を示す。最低限必要な頂点数としては14点(首・肩・袖・脇・ウエスト)であるが、これに加えて衣服の形状の複雑さやユーザがどのくらい細かく作りたいか等の好みによって増加する。

この工程により、ユーザはアバター用衣装として再現したい衣服の領域を抽出する。抽出作業中に用いる外郭の線の色は黒色と赤色の2色から選択可能であり、衣装にしたい衣服の色に合わせて作業しやすい色を選ぶことが可能である。抽出工程で選んだ色は作業の効率化を目的とした色であり、抽出工程で選んだ色に関わらず出力される衣装画像の外郭の線は黒色で制作される。抽出工程後、ユーザは抽出された衣服画像に対して外郭線の描画の有無を選択することが可能である。

4.3 衣装画像の制作

入力画像から抽出された衣服の画像に対して3つの衣装候補を作成する。(図4)。1つ目は入力画像から切り出したそのままの衣装画像である(図4(a))。2つ目はk-means手法を用いて色数を3色に減らした衣装画像である(図4(b))。3つ目はk-means手法を用いて得られた3色のうち最も使用されている色を用いた単色の衣装画像である(図4(c))。イラストは実際の写真と比較して用いられる色数が少ないとから、本手法ではk-means法を用いた色数の減色により写真画像からイラスト調への変換を行っている。

また、テクスチャを別の画像から読み込むこともでき、ユーザはスカートの柄などを別途写真を撮ることでより正確に柄を再現することが可能となる。写真を撮影する際に、撮影環境の明るさや光が当たる方向によって細かな柄が潰れてしまうことがある。そのため、細かな柄を再現するには別途柄のみを撮影した写真が必要となる。ユーザは別途撮影した柄の写真を選択したのちにマウスドラッグで使用したい範囲を選択し、正方形に切り出す。その後、選択した範囲を新たなテクスチャ素材として用いることで衣装に用いるテクスチャ画像を制作する。

ユーザが範囲選択をすることで得た新たなテクスチャをタイル状に並べていくことで画像サイズの大きいテクスチャ



図4 提案する3つの衣装候補画像
Fig. 4 Three candidate costume images to be proposed



図5 ImageQuilting手法の有無の比較
Fig. 5 Comparison with and without ImageQuilting method

を作成し、衣装として使用する。並べる際に単にテクスチャ素材を並べると画像同士の境目が不自然になってしまうので、ImageQuilting手法²³⁾を参考に画像を繋ぎ合わせていく。まず、ユーザが範囲選択した画像を4×4の計16枚のテクスチャ画像に分割する。その後各テクスチャ画像の上下左右8ピクセルずつをのりしろとして重ねていく。重ねていく際には、重ねる画像とそれ以外の7枚の画像ののりしろ部分を比較し、近いものを並べていく。この手法を用いることで繋ぎ目の違和感や不自然な繰り返しが目立たないサイズの大きなテクスチャ画像を得ることができる。

こうして別途撮影した柄の画像を衣装のテクスチャとして使用することで、撮影時の環境等によって潰れてしまうような細かな柄も再現することが可能となる(図5)。

4.4 衣装の着せ替えとユーザインタフェイス

ユーザは図6のような画面で作業を行う。まず、画面右側の中段に提示されている衣装画像の候補から気に入った衣装画像を選択する。4つのボタンのうち、左上が入力写真をそのまま用いた衣装画像、右上がk-means法を用いて色数を減らした衣装画像、左下が代表色を用いた衣装画像、そして右下が別途用意した写真画像からテクスチャを制作するボタン



図 6 提案手法 1 の作業画面
Fig. 6 Working screen of proposed method 1



図 7 画像生成強度の比較 1
Fig. 7 Comparison of strength 1

となっている。衣装画像を選択すると画面左側にあるアバター上に選択した衣装画像が表示され、ユーザはアバター上に表示された衣装画像をドラッグしてアバターに合う位置に移動させることでアバターを着せ替える。衣装画像のサイズ合わせは、画面右側の上段にある 3 つのスライダーを用いて行う。上から 1 本目のスライダーは衣装画像の幅と高さを等倍に変更するスライダー、2 本目は衣装画像の高さを変えずに幅のみ変更を行うスライダー、3 本目は衣装画像の幅を変えずに高さのみ変更を行うスライダーとなっている。作業終了後は画面右下にある保存ボタンを押し、衣装のみの画像と生成した衣装を着用したアバターの画像の 2 つを出力する。

5. 提案手法 2：画像生成を用いた衣装制作手法

本手法では、まずアバターに着せたい衣服の写真を選択または撮影し、その写真画像を入力とする。その後入力画像に対して背景等の不要な部分を削除したのちに画像生成モデルを用いて衣服の写真画像をイラスト調に変換し、衣装候補となる画像を 3 枚生成する。ユーザはその中から気に入ったものを 1 つ選択し、アバターに合わせてサイズを調整する。最後にアバターと衣装画像を重ねて確認をしながらアバターに合うようにサイズを調整して着せ替えを行う。出力画像は生成した衣装のみの画像と生成した衣装を着用したアバターの画像の 2 つである。画像生成には StableDiffusion²⁴⁾を用いている。

5.1 画像生成を用いた衣装制作

画像生成には画像生成システムである StableDiffusion²⁴⁾の img2img を使用し、学習モデルには Counterfeit-V2.5²⁵⁾を用いる。また、StableDiffusion²⁴⁾の拡張機能である ABG-extension²⁶⁾を用いて、入力画像に含まれる背景を削除する。

まず、提案手法 1 と同様の手順(4.1節)で撮影した入力画像に対して、ABG-extension²⁶⁾を用いて背景を削除する。この工程により背景は削除されるが首や腕といった身体は透過されないため、画像生成後に不要な領域を削除しなければならない場合がある。また、入力画像に衣装としてアバターに着せたい衣服以外の衣服が写っていた場合も、不要な領域と



図 8 画像生成強度の比較 2
Fig. 8 Comparison of strength 2

して削除しなければならない。たとえば、全身を撮影した入力画像に対してスカートのみを衣装として着せたい場合は、トップスの部分を削除する必要がある。そのため、ユーザは着せ替え工程に移行する前に不要な範囲が残っていないか確認を行う必要がある。不要な範囲が残っていた場合は、その部分を塗り絵のように塗りつぶすことで不要な範囲を選択し、マスク画像を作成することで不要な領域を削除する。

不要な領域を削除した衣服の写真画像に対して、StableDiffusion²⁴⁾を用いて写真画像をイラスト調に変換する。衣装候補画像生成時に使用する学習モデルは画像を生成する際には、アニメイラストの生成に特化したモデルである Counterfeit-V2.5²⁵⁾を用いる。画像生成時にはどれぐらいイラスト調に変換するかという生成強度を 0.0 から 1.0 の範囲で指定する。生成強度は 0.0 に近いほうが写真に忠実で 1.0 に近くなるほどイラスト調になるが、衣服の形の破綻やノイズが多くなってしまう(図 7, 図 8)。破綻やノイズが多く存在する場合、入力画像とした衣服のデザインとは異なるデザインになってしまったり、衣装として成立しない可能性がある。そのため、本手法では破綻やノイズが目立たない生成強度として、0.25, 0.30, 0.35 で生成した 3 つの画像を衣装候補として使用する。

5.2 衣装の着せ替えとユーザインタフェイス

ユーザは図 9 のような画面で作業を行う。まずユーザは画面右側の中段にある候補の中から気に入ったものを選択する。



図 9 提案手法 2 の作業画面
Fig. 9 Working screen of proposed method 2

提示されている衣装画像候補は左上が生成強度 0.25 で生成した画像、右上が生成強度 0.30 で生成した画像、そして左下が生成強度 0.35 で生成した画像となっている。提示されている衣装画像候補の中に気に入ったものがなかった場合は、画面右側の下段にある再生成ボタンを押すことで、衣装画像の再生成を行うことが可能である。再生成は同じ入力画像と条件で行われ、気に入ったものが生成されるまで何度も再生成を行うことが可能である。再生成ボタンを押すと、画面右側中段に表示される衣装画像候補が変更され、それまでに提示されていた衣装画像候補は全て破棄される。そのため、再生成を繰り返す中で候補として保留しておきたいものがあった場合は候補を保持しておくことが可能である。ユーザが保持することができる画像は 3 つまでとなっており、すでに 3 つの候補画像を保持している状態で新たに候補画像を保持したい場合はすでに保持されている候補画像のうちのどれか 1 つを破棄する必要がある。衣装画像候補を選択後は、画面右側の上段にあるスライダーを用いてサイズをアバターに合うように調整する。スライダーの操作方法は提案手法 1 と同様(4.4節)である。サイズ調整後は衣装画像をドラッグしてアバターに衣装画像を重ねることで着せ替えていく。作業終了後は画面右下にある保存ボタンを押し、衣装のみの画像と生成した衣装を着用したアバターの画像の 2 つを出力する。

6. 実行結果と考察

6.1 実行結果

まず提案手法 1 を用いた実行結果を示す(図10)。図10(a)について、トップスは色数を 3 色に減らした衣装画像を、スカートは入力画像をそのまま用いた衣装画像を使用している。図10(b)について、トップスは別途用意した水玉模様の画像を、スカートはスカートの柄を別途撮影した画像を用いている。

次に、提案手法 2 における実行結果を示す(図11)。図11(a)は生成強度 0.25 で生成した衣装画像を、図11(b) は生成強度 0.30 で生成した衣装画像を使用している。

また、衣服以外を入力とした実行結果を図12に示す。



図 10 提案手法 1 の実行結果
Fig. 10 Execution results of proposed method 1



図 11 提案手法 2 の実行結果
Fig. 11 Execution results of proposed method 2



図 12 帽子を入力とした実行結果
Fig. 12 Execution result with hat as input

6.2 考察

2 つの提案手法について、提案手法 1 はアバターの体型に合わせてユーザが衣装の形を決めることができるという特性上、提案手法 2 の実行結果と比較して実行結果を比較して提案手法 1 を用いた実行例の方が肩の部分がアバターに合っていることがわかる。よって、提案手法 1 は提案手法 2 と比較して、衣装制作工程へのユーザによる介入が多いことからアバターの体型に合わせた衣装制作という点で優れていると言える。また、ユーザが入力画像とは異なる任意の画像を衣装のテクスチャとして使用できる点や、制作に使用するパソコンの機能を問わない点も提案手法 1 の強みである。

一方で、提案手法2は提案手法1の実行結果と比較してより自然に影やシワが衣装に再現されていることがわかる。また、セーターの編み方による柄などの細部も再現されている。よって、提案手法2は提案手法1と比較して、より正確で自然な衣装の生成という点で優れていると言える。また、提案手法1ではユーザが行っていた工程をシステムが行うため、ユーザの作業量が減少しより容易になった点も提案手法2の強みである。

以上の比較により、提案手法1は衣装制作工程に対してユーザが介入できる余地を多く残していることから自由度の高いアバター用衣装制作に向いており、提案手法2はシステムが行う工程が多いことから、より短時間かつ質の高いアバター用衣装制作に向いている。また、従来手法と比較した際には、作業時間という点で両手法とも従来手法より優れていると言える。

7. 評価実験の結果と考察

画像生成を用いた衣装生成を実装した提案システムを使用して、12人のユーザが自身の衣服の写真を用いて2Dアバター用衣装の制作を行った。参加者は20~43歳(SD:7.04)の女性である。参加者全員がモデリング未経験者であった。

評価実験では、最初に全身を撮影し、提案システムについて説明を行ったのちに、参加者は提案システムを利用した2Dアバター用衣装制作を行った。提案システムを利用し、2Dアバター用衣装を制作したのちに、アンケート記入を依頼した。アンケートは「制作物について」と「システムについて」の2部構成となっており、それぞれの質問項目を表1に示す。また、評価実験に使用された入力画像とその制作物の例について図13に示す。

7.1 制作物についてのアンケート結果と考察

「制作物が入力画像として使用した衣服に似ているか」という質問に対し、5人が「とても似ていると思った」、7人が「似ていると思った」と回答した。その理由として、「色も柄も似ていた」「服装の色合いやフォルムが本物とあまり変わらなかった」といった意見があげられた。また、「制作物を着用したアバターを見て、おそろいコーデをしている感覚になったか」という質問に対しては、11人が「おそろいをしていると感じた」1人が「すこし感じた」と回答した。以上の結果から、提案システムを利用して制作した衣装は、入力画像とした衣服に極めて類似したデザインを特徴として持ち、おそろいコーデとして十分な再現度であることがわかった。「自身で同じデザインの衣装を描いた際に、提案システムによる衣装と自身で描いた衣装のどちらを使用したいか」という質問に対しては11人が「提案システムによる衣装」と回答したが、1人は「自身で描いた衣装」と回答した。これにより、提案システムは概ね従来のユーザが描く手法よりも優れているといえる。

「アニメ調のアバターとマッチしていると思ったか」という質問に対し、7人が「マッチしていると思った」、5人が「ややマッチしていると思った」と答えており、「生成された衣服のクオリティに満足したか」という質問に対しては、8人が「満足した」、3人が「やや満足した」、1人が「あまり満足しなかった」と答えており、満足した理由については「襟やボタンの雰囲気、柄まで再現されていたから」「袖が少しふわっとした形で切れ目が入っているのですが、その感じが再現されていたから」「洋服の生地の雰囲気も再現されているように感じて感動しました。」といった意見があった。満足しなかった理由については「ワンピースの細かい柄が単色になっていた」といった意見があった。

7.2 システムについてのアンケート結果

「システムの扱いやすさ」についての質問に対して、6人が「使いやすい」5人が「おおむね使いやすい」1人が「すこし扱いにくかった」と回答した。扱いやすさと感じた理由について、「インターフェイスがわかりやすかった」「操作が簡単だった」「撮影から完成までスムーズだった」といった意見が挙げられた。一方で、扱いにくいと感じた理由について、「手や首といった不要な部分をユーザが消す工程の難しさ」や「アバターの体格に制作した衣装をぴったり合わせることの難しさ」が挙げられた。このことにより、提案システムについて、不要部分の除去工程の補助と試着工程における衣装のより自由な変形が課題といえる。

システムのユーザ評価として満足度評価指標 System Usability Scale (SUS)²⁷⁾を用いた評価の結果を表2および図14に示す。SUS評価の平均値は67.5、中央値は72.5であった。平均値はSUSの業界基準値である68とほぼ一致しており、全体として「平均的な使いやすさ」を有しているといえる。

一方で、標準偏差は18.5とやや大きく、得点範囲も32.5~87.5と広いため、参加者間の評価には大きなばらつきが見られた。四分位範囲(58.1~81.3)から、多くのユーザは「やや使いやすい」と感じているが、下位25%の参加者は50点未満の低評価を示していることがわかる。

分布をみると、80点以上の高評価をつけたユーザが4人、70点前後の標準~良好の評価をつけたユーザが4人いる一方、45点以下の低評価をつけたユーザも3人存在しており、評価が二極化している傾向が明らかとなった。すなわち、特定の条件やユーザ層にとっては非常に高く評価される一方、別の層にとっては使いにくいと感じられている可能性がある。今後は高評価を得た要素を維持しつつ、低評価の要因を特定・改善することで、より安定して高いユーザビリティを実現できると考えられる。

7.3 制作時間について

各参加者の作業時間について表2に示す。平均作業時間は3分21秒であった。また、最も短い参加者は2分8秒、もつ

表 1 行ったアンケートの内容

Table 1 Content of the survey conducted

質問内容		回答形式
Q1	元の衣服に似ていると思いましたか。	4. とても思った - 1. 思わなかった
Q2	完成したアバターを見て、 そろいコーデをしている感覚になりましたか。	4. おそろいをしている感覚になった - 1. ならなかった
Q3	今回制作した衣装と自分で描いた衣装のどちらを使用したいですか	1. 自分で描いた衣装, 2. 今回制作したもの
Q4	システムの扱いやすさはどうでしたか。	4. 使いやすかった - 1. 使いにくかった
Q5	使いやすかった部分があれば教えてください	自由記述
Q6	使いにくかった部分があれば教えてください	自由記述
Q7	追加して欲しい機能があれば教えてください	自由記述
Q8	アニメ調のアバターとマッチしていると思ったか	4. 思った - 1. 思わなかった
Q9	生成された衣服のクオリティに満足したか	4. 満足した - 1. 満足しなかった

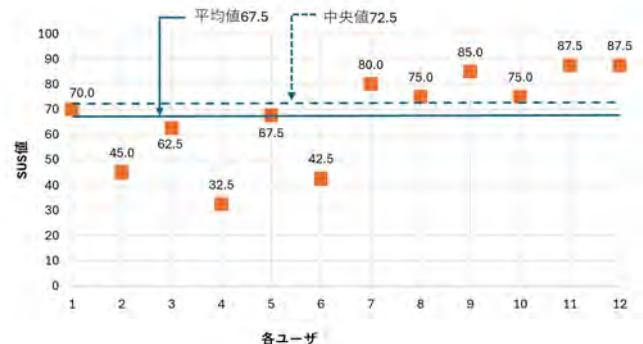
表 2 評価実験の結果

Table 2 Results of evaluation experiments

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q8	Q9	SUS 値	制作時間	生成強度	再生成回数
P1	4	4	2	4	4	4	70.00	4分36秒	0.35	0
P2	3	4	2	4	3	2	45.00	2分08秒	0.25	0
P3	3	4	2	4	4	4	62.50	4分17秒	0.25	0
P4	4	4	1	3	4	4	32.50	3分06秒	0.30	0
P5	4	4	2	3	3	3	67.50	3分14秒	0.35	0
P6	3	4	2	3	3	3	42.50	3分17秒	0.25	2
P7	3	3	2	2	3	4	80.00	2分08秒	0.35	0
P8	3	4	2	4	4	4	75.00	3分19秒	0.35	5
P9	3	4	2	3	4	3	85.00	3分30秒	0.25	0
P10	4	4	2	3	3	4	75.00	3分21秒	0.30	1
P11	3	4	2	4	4	4	87.50	4分13秒	0.30	0
P12	4	4	2	4	4	4	87.50	3分14秒	0.25	0

図 13 評価実験に使用された入力画像とその制作物の例
Fig. 13 Examples of input images used in evaluation experiments and their productions

とも長い参加者は 4 分 36 秒であった。このことから、提案システムを使用した場合、短時間で 2D アバター用衣装を制作可能であるといえる。

図 14 ユーザごとの SUS スコアのプロット
Fig. 14 Plot of SUS Scores by User

7.4 制作物について

本システムから提案する異なる生成強度からなる 3 つの衣装候補画像について (表 2), 生成強度 0.25 の画像を選んだのは 5 人, 生成強度 0.30 の画像を選んだのは 3 人, 生成強度 0.35 の画像を選んだのは 4 人であった。また, 制作過程で 2D アバター用衣装の画像の再生を行ったユーザは 3 人でそれぞれ 2 回, 1 回, 5 回であった。

8. 制 約

入力画像にはいくつかの制約が存在する。入力画像はその後の工程でアバターに着せる都合上, アバターのポーズに腕

表3 既存インターフェースと提案インターフェースの定性的比較

Table 3 Qualitative comparison between the existing and proposed interfaces

観点	既存 UI (ComfyUI, Gradio 系)	提案 UI
操作性	ノード構築やパラメータ調整が必要で複雑	操作がクリック中心で直感的に利用可能
学習コスト	高い (専門知識やドキュメント読解が必須)	低い (初心者でも短時間で利用可能)
安定性	高度設定に依存する	安定性を優先した設計により再現性が高い
柔軟性	高度な制御・多様なカスタマイズが可能	特定の操作に限定される
ターゲット層	研究者・上級ユーザ向け	一般ユーザ・初学者も対象

や足が合ったものである必要がある。また、ズボンや袖が細めの服の場合は多少の違いでアバターに合わせられなくなる場合があるため、より正確に合わせる必要がある。撮影時の背景に関しては制約はないが、明るさに関しては、暗すぎるまたは明るすぎるなどの環境の場合、制作される衣装画像の色味が実際の色味と異なる可能性がある。

提案システムでは衣装を制作できる衣服の種類が限られている。たとえば、シースルーやチュールといった透け感のある素材が用いられている衣服を入力画像とすることはできない。これは、写真から衣装画像のテクスチャを制作するという本研究の特性上、生地の下に透けた肌を衣服の柄として扱ってしまうためである。また、ズボンや袖が細めの服の場合は足や腕の開き方がアバターと異なっている場合、多少の違いでアバターに合わせられなくなることがあるため正確に合わせる必要があり、提案システムでは容易ではない。加えて、提案システムでは前を開けているアウターのみなど左右に衣服が分かれている衣装を制作することはできない。

また、黒単色のシンプルなワンピースにおいて衣装が生成されないという現象が起きたケースがあった。Stable Diffusion の背景処理において二値化で作成したマスクを使用するため、真っ黒が消えてしまったと推測する。生成 AI の拡張機能を使わずに、衣服の柄に応じて背景マスク色を選定できるように実装するなどして対応することで解決できると考える。

9. まとめと今後の課題

本研究では、写真をイラスト調へと変換する2つの手法を提案し、それぞれを実装した2Dアバター用衣装制作支援システムの提案を行った。また、画像生成を用いた衣装制作による2Dアバター用衣装製作支援システムの評価実験を行った。その結果、ユーザが衣装を描くという従来手法よりも極めて短い作業時間でより優れた衣装を制作できることが示され、提案システムの有用性が確認された。

今後の課題としてより広いニーズに対応するために、まず衣装を制作できる衣服の種類の増加が挙げられる。8章で述べた制限を踏まえて新たな入力画像の処理の仕方を検討したい。また、評価実験で得られた意見をもとに提案システムの改善を行っていきたい。

生成強度については0~1の範囲で設定可能であるものの、0.4以上になると画像の破綻が多く発生するため、安定性を

考慮して0.35以下に設定した。今回の実験でアニメ調アバターでも比較的写実的な画像(0.25)が選ばれる傾向もみられたが、よりアニメ調に近い画像生成(0.4以上)についても今後検討する。また、生成したテクスチャへのしわや影の付加処理についても検討する。さらに、現行の手法は静的な前面写真を前提としているがLiらの手法²⁸⁾を応用するなどして、骨格情報の活用を検討したい。

また、本論文では、提案システムの有効性を主にユーザ実験を通じて検証したが、ComfyUIやGradioベースのWebインターフェースといった既存インターフェースとの直接的な定量比較は実施していない。本稿では既存インターフェースと提案インターフェースの設計上の特徴を表3に整理し、操作性・学習コスト・安定性・柔軟性・ターゲット層の観点から比較した。また、生成アルゴリズムの品質評価についても、LPIPS, SSIM, PSNR, CLIPScore, IoUなどの指標を用いた定量的な分析を行うことで、再現性や出力一貫性を客観的に評価できる余地があるため今後の課題としたい。さらに、本研究は2Dアバター用衣装の制作を支援するものであるが、写真から衣装画像を制作する工程は3Dアバター用衣装制作においても衣装モデルのテクスチャ制作の面で転用できると考えている。そのため、開発を進めていくことで2Dアバターから3Dアバターへと発展させていきたい。

参考文献

- 1) 工藤 義礎: “バーチャルライブ配信プラットフォーム REALITY”, 日本バーチャルリアリティ学会誌, 26巻, 1号, pp. 28-29 (2021).
- 2) VRChat, <https://www.vrchat.com/>
- 3) D. Hepperle, C. F. Purps, J. Deuchler, M. Wölfel: “Aspects of Visual Avatar Appearance: Self-Representation, Display Type, and Uncanny Valley”, The Visual Computer, Vol.38, pp.1227-1244 (2022).
- 4) E. Han, M. R. Miller, C. DeVeaux, H. Jun, K. L. Nowak, J. T. Hancock, N. Ram, J. N. Bailenson: “People, Places, and Time: a Large-Scale, Longitudinal Study of Transformed Avatars and Environmental Context in Group Interaction in the Metaverse”, Journal of Computer-Mediated Communication, Vol. 28, Issue 2 (2023).
- 5) Y. Li, J. Sun, C.-K. Tang, H.-Y. Shum: “Lazy Snapping”. ACM Trans. on Graph. Vol. 23, No. 3, pp. 303-308 (2004).
- 6) J. Wang, M. Agrawala, M. F. Cohen: “Soft Scissors: an Interactive Tool for Realtime High Quality Matting”. ACM Trans. on Graph. Vol. 26, No. 3, pp. 9-es (2007).
- 7) A. Levin, D. Lischinski, Y. Weiss “A Closed-Form Solution to Natural Image Matting,” IEEE Trans. on Pattern Analysis and

Machine Intelligence, Vol. 30, No. 2, pp. 228-242 (2008).

8) T. Igarashi, T. Moscovich, J. F. Hughes: “As-Rigid-As-Possible Shape Manipulation”. ACM Trans. Graph. Vol. 24, No. 3, pp. 1134-1141 (2005).

9) N. S. Willett, H. V. Shin, Z. Jin, W. Li, A. Finkelstein: “Pose2Pose: Pose Selection and Transfer for 2D Character Animation”. Proc. of the 25th International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI '20), pp.88-99 (2020).

10) ComfyUI. <https://www.comfy.org/>

11) Gradio. <https://www.gradio.app/>

12) 上原 行平, 田内 康, 水上 嘉樹: “写真画像から衣服モデルを生成する仮想試着システムに関する研究”, 映像情報メディア学会技術報告, 41.09 卷, 41.09 ヒューマンインフォメーション/立体映像技術, セッション ID HI2017-54, pp. 5-8 (2017).

13) X. Han, Z. Wu, Z. Wu, R. Yu, L. S. Davis: “Viton: An Image-based Virtual Try-on Network”, Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 7543-7552 (2018).

14) S. Yang, T. Ambert, Z. Pan, K. Wang, L. Yu, T. Berg, M. C. Lin: “Detailed Garment Recovery from a Single-View Image”, 10.48550/arXiv.1608.01250 (2016).

15) K. Tango, M. Katsurai, H. Maki, R. Goto: “Anime-to-Real Clothing: Cosplay Costume Generation via Image-to-Image Translation”, Multimedia Tools and Applications, Vol. 81, Issue 20, pp.29505-29523 (2022).

16) 西奥一樹, 安藤大地, 向井智彦: “アバターの体型とユーザの好みを考慮したシャツ形状デザインシステムの提案”, 第 84 回情報処理学会全国大会講演論文集 (2022).

17) Y. Liu, W. Chen, L. Liu, M. S. Lew: “SwapGAN: A Multi-stage Generative Approach for Person-to-Person Fashion Style Transfer,” IEEE Trans. on Multimedia, Vol. 21, No. 9, pp. 2209-2222 (2019).

18) Y. Chen, Y.-K. Lai, Y.-J. Liu: “CartoonGAN: Generative Adversarial Networks for Photo Cartoonization,” 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 9465-9474 (2018).

19) L. A. Gatys, A. S. Ecker, M. Bethge: “Image Style Transfer Using Convolutional Neural Networks,” Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 2414-2423 (2016).

20) J. Johnson, A. Alahi, L. Fei-Fei: “Perceptual Losses for Real-Time Style Transfer and Super-Resolution”, Computer Vision – ECCV 2016. (Lecture Notes in Computer Science), Vol. 9906, pp.694-711 (2016).

21) N. Isozaki, S. Ishima, Y. Yamada, Y. Obuchi, R. Sato, N. Shimizu. “VRoid Studio: a Tool for Making Anime-like 3D Characters using Your Imagination”, SIGGRAPH Asia 2021 Real-Time Live! (SA '21). Article 9, p.1 (2021).

22) M. Ma, M. Gotsis, B. Harris-Lowe, M. Coopilton: ‘Inclusive Character Creator: A Showcase of Inclusive Design Principles for 3D Character Creators”, ACM SIGGRAPH 2022 Posters (SIGGRAPH '22). Article 17, pp.1-2 (2022).

23) A. A. Efros, W. T. Freeman: ”Image Quilting for Texture Synthesis and Transfer”, Proc. of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '01), pp.341-346 (2001).

24) R. Rombach, A. Blattmann, D. Lorenz, P. Esser, B. Ommer: “High-Resolution Image Synthesis with Latent Diffusion Models”, Proc. of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) pp. 10674-10685 (2022).

25) gdgsfsfs: “Counterfeit-V2.5”,
<https://huggingface.co/gsdf/Counterfeit-V2.5>

26) KutsuyaYuki : “ABG_extension”,
https://github.com/KutsuyaYuki/ABG_extension

(2025年3月21日受付)

(2025年10月13日再受付)

坂本 夏海



2023年 お茶の水女子大学理学部情報科学科卒。
 2025年 お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科理学専攻情報科学コース修了。在学中, HCIに関する研究に従事。

五十嵐 悠紀 (正会員)



2010年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。日本学術振興会特別研究員DC2, PD, RPDを経て2015年より明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科専任講師, 2018年より同准教授。2022年よりお茶の水女子大学理学部情報科学科准教授。2025年より東京大学先端科学技術研究センター准教授(クロスアポイントメント)。コンピュータグラフィックス及びユーザインターフェースに関する研究に従事。

Frame-Break：アナモルフォーシスを用いた裸眼立体映像の立体感の強化

徳 永 恵 太[†] 藤 代 一 成[†](名誉会員)

[†]慶應義塾大学

Frame-Break: Enhancing the Stereoscopic Effect of Anamorphosis-Based Naked-Eye 3D Images

Keita TOKUNAGA[†], Issei FUJISHIRO[†] (*Honorary Member*)

[†]Keio University

〈あらまし〉 徳永らはアナモルフォーシスとよばれるデザイン技法を応用した裸眼立体視システムを提案している。このシステムでは、運動視差を誘発することでユーザに立体感を与えており、オブジェクトの位置とユーザの視点位置によってはオブジェクトに見切れが発生し、立体感を低下させることが問題として挙げられている。本論文では、この問題を解決するために、近年、立体広告などでも利用されているframe-breakという手法を、このシステムに組み込むことを提案し、実際に立体感を増強する効果を検証する。

キーワード：裸眼立体視、運動視差、アナモルフォーシス、フレームブレイク

〈Summary〉 Tokunaga et al. proposed a naked-eye stereoscopic imaging system based on a classic design technique called anamorphosis. The system, however, faces a limitation: depending on the location of viewer's viewpoint, portions of the displayed objects may extend beyond the rendering area and become invisible, thus diminishing the stereoscopic effect. To address this issue, we propose to incorporate into the system the frame-break effect, a technique recently employed in filmmaking and large-scale public display advertisements. This paper reports the results of an initial empirical study to evaluate the effectiveness of this proposed enhancement.

Keywords: naked-eye 3D view, motion parallax, anamorphosis, frame-break effect

1. 背景と目的

ある視点から見たときのみ正常な投影像が見えるように構図を工夫して作品を描くデザイン技法が知られており、アナモルフォーシス (anamorphosis) とよばれている。例として、永井秀幸¹⁾の作品を図1に示す。永井は、壁と床に対してL字状に開いたスケッチブックを用いて、アナモルフォーシスを利用したトリックアート作品を数々発表している。そこでは、スケッチブックの2枚の画用紙にそれぞれ壁と床というメタファーを与え、壁から突起するオブジェクトの影を床面に落とすことでユーザに錯覚を引き起こし、3次元のプレゼンスを与えており、その特性上、特定の視点から見た場合には立体的な絵が見られるが(図1(a))、視点を動かすと所定の構図は崩れ、立体感が損なわれてしまう(図1(b))。

徳永ら²⁾は、永井の作品群におけるL字状に開いたスケッチブックの2枚の画用紙を、直交に配置した2枚のディスプレイモニタに置き換えた。図2に徳永らのシステムを実装し

た様子を示す。ユーザの視点の位置に合わせて正常な投影像が常に見えるように映像を更新し続けることで、異なる視点から見ても構図が崩れないことが確認できる。このシステムは、市販されている既存のディスプレイモニタとwebカメラのみを用いて、安価に裸眼立体視を実現しているだけでなく、豊富な色数や高い描画密度をもった単一ユーザ向けの裸眼立体視を実現している。また、永井の作品に見られた構図に加え、ユーザの運動視差を誘発することで立体感を増強している。他にも、運動視差を用いた立体感は、両眼視差を用いている立体映像生成システムと比べ、眼精疲労が少なく長時間利用しやすいという利点も有する。ただし、アナモルフォーシスは単眼を前提とした技法であるため、立体感を与える要素の一つである両眼視差を与えられず、両眼で見ると立体感が低下する問題が指摘されている。そこでこのシステムは、ユーザごとに簡易なキャリブレーションを行うことで両眼視差の影響を軽減し、立体感の低下を防いでいる。

徳永ら²⁾のシステムは、一般的なディスプレイモニタ上に映像を映しているため、視点移動による映像の変化だけでなく、動的なシーンを映すことも可能である。しかし図3(a)のように、視点とシーンの位置関係によっては、オブジェクトが画面の描画範囲からはみ出してしまうことがあり、その一部が欠落すると立体感を損なわせてしまう課題が指摘されていた。永井は、スケッチブックにオブジェクトの輪郭にそつて切り揃えられた画用紙片を立体的に糊付けしてこの課題を解決していた。しかし、常に投影像を変更する徳永らのシステム²⁾では、この方法に準じた解決策をとることはできない。井阪ら³⁾は、第三面のディスプレイモニタを側方に配置し、背後の実シーンにオブジェクトを重畳表示することで解決を試みたが、追加のディスプレイモニタを用いることや、第三面に投影する背面映像をwebカメラで取得する必要があり、近年見られるようになった折畳み式ディスプレイモニタにシステムを換装する場合、本来の手法がもつ軽薄短小性を損なってしまう。

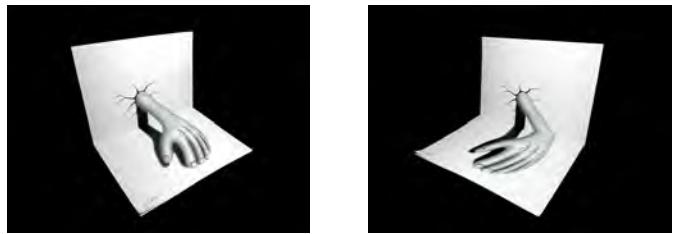
ところで、映画上映手法の一つであるIMAX⁴⁾においてframe-breakとよばれる技法が用いられている。frame-breakとはあらかじめスクリーンに余裕をもたせておき、手前に飛び出すシーンにおいてオブジェクトを余っている領域にも投影する手法である。これによって、映像の投影範囲からあたかもオブジェクトが飛び出しているかのように錯覚させている。これは近年、大型のデジタル3Dサイネージにも用いられている⁵⁾。我々は、この手法を徳永らのシステムに組み込むことで、上記の問題を改善できるのではないかと考えた。実際にframe-breakを適用した例を、図3(b)および補足資料の動画に示す。

本論文では、まず、徳永らのシステムの立体感向上を目指し、「余白」を定義することでframe-break効果を組み込む手法を提案する。そして、システムに組み込んだ場合の立体感の変化について3種類のシーンで実験し、その効果を報告する。また、余白の大きさを変えた場合の立体感の変化についても実験を行い、その分析結果を報告する。

本論文は次章以降、以下のように構成される。2章では他の立体映像に関する研究やシステムについて述べ、本手法の位置づけを明らかにする。3章では徳永らのシステムの処理と、同システムにframe-breakを組み込む手法について述べる。4章では徳永らのシステムにframe-breakを組み込み、その立体感の影響について調べた実験と結果について述べる。5章では前章の考察を述べる。最後に6章で本論文の結論を述べ、今後の課題に言及する。

2. 関連研究

本章では、立体視ディスプレイに関わる研究について説明し、徳永らのシステムの位置づけ、および本研究の意義を明確にする。



(a) 正しい視点 (b) 他の視点

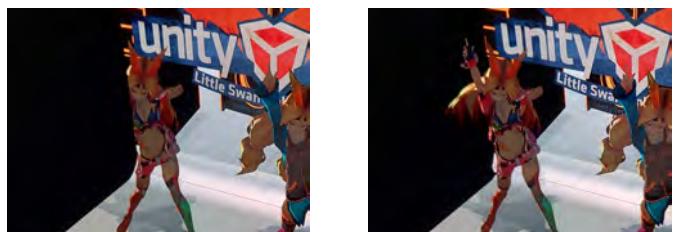
図1 永井秀幸の作品例

Fig. 1 An artwork by Hideyuki Nagai



図2 徳永ら²⁾の裸眼立体映像システム

Fig. 2 The original naked-eye stereoscopic imaging system proposed by Tokunaga et al.²⁾



(a) frame-break 無し

(b) frame-break 有り

図3 frame-break 有無の比較

Fig. 3 Comparison between frame-break enabled and disabled

2.1 浸入型インターフェース

ユーザを取り囲むように大型スクリーンを組み合わせることで立体視を実現する没入型表示システムが知られている。その代表例としてCAVE⁹⁾を挙げる。CAVEは、ユーザの視点の移動に合わせて周囲を取り囲む複数の大画面にオブジェクトを描画することで、バーチャル空間に没入しているような感覚をユーザに体験させる。ユーザにはメガネ型デバイスを装着させ、液晶シャッターを使うことで両眼に異なる映像を届け、両眼視差を実現している。このシステムの難点は、大きな空間を必要とすることに加え、専用デバイスを装着しなければ立体映像を体感できないことである。また、スクリーン境界では歪みが大きくなることも報告されている¹⁰⁾。完全な裸眼立体視を実現するには、両眼から得られる奥行き知覚をより正確に提示しなければならないため、装置が大規模になり、描画コストが高くなるという欠点がある。一方、徳永らの手法で必要なデバイスは、汎用ディスプレイモニタと視

点位置追跡が可能な web カメラのみのため、専用デバイスを必要とせず、ユーザに負担をかけずに両眼視差の影響を軽減しつつ、運動視差の影響を考慮した立体映像が提示可能である点で有利である。

2.2 ヘッドマウントディスプレイ

近年、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いてバーチャル空間を体験することが身近になっている。VR で楽しめるコンテンツも増えてきており、HMD は現在立体映像を体験できる最も一般的な手段であるといえる。市販されているビデオシースルー型 HMD の例として、Meta Quest 3¹¹⁾ を挙げる。HMD は頭部の動きに合わせて両眼の映像を生成することで、バーチャル空間内に入り込んだような体験ができる。しかし、HMD には VR 酔いの問題がある。これは VR 体験中に生じるめまいや吐き気のことで、HMD の映像と人間が期待する加速度のずれによって生じると考えられている。また、裸眼で体験することができないため、周辺の様子を確認できず、アウトドアでの使用に危険が伴う場合がある。光学シースルー型 HMD を利用すればこの問題は解決されるが、背景映像が透けたり投影映像が暗くなるなどの問題が生じ、映像の品質が低下する。それに対し、裸眼で体験できる点、酔いが生じない点で徳永らのシステムの方が有利である。

2.3 空間描画型立体ディスプレイ

空間に発光する物体を生成、あるいは光を散乱する物質で満たし、その物質に光を当てることで空間に直接描画し、立体視を実現する空間描画型ディスプレイについて述べる。これらのディスプレイは、空間上に実際に描画しているため、多視点に対応した裸眼立体映像を実現している。石川ら¹²⁾は、空気中にプラズマを発生させることで立体映像を描いている。しかし、このようなディスプレイは現在のディスプレイモニタのような描画密度を実現できていない。また、異なる色で発光させるためには膨大なコストがかかり、色数を増やすことも難しいことが問題として挙げられる。Rakkolainen ら¹³⁾は、空気中にフォグを発生させ、そこに光を散乱させることで立体映像を描画している。このシステムは、プロジェクタを利用して映像を投影しているため、前述の手法と異なり色数は確保できる。しかし、散乱を利用しているため輝度が低く、散乱させる物質の密度によっては背景が透けて見える。これらのような空間描画型立体ディスプレイは、ほとんどの場合専用のデバイスが必要であり、高価なことも課題である。これらのディスプレイは多人数・多視点の立体映像を実現できるものの、映像の品質やコストの点から、一般に普及するにはまだ時間を要するといえ、既存のディスプレイで安価に実現できる点で徳永らのシステムの方が有利である。

2.4 レンチキュラー型立体ディスプレイ

ディスプレイモニタに特殊なフィルムを貼ることで両眼に異なる映像を提供し、裸眼立体映像を実現するシステムにつ

いて述べる。このような裸眼立体ディスプレイは古くから見られ、Nintendo 3DS¹⁴⁾がその代表例である。この立体ディスプレイは裸眼で両眼視差を実現できるが、正確な映像を生成しなければユーザに酔いを引き起こすという欠点がある。また、視点によっては左右の目に正しい映像を届けられず、立体感が損なわれてしまうディスプレイも知られている。また、両眼に映像を分けるため、ディスプレイモニタが暗くなる。SONY の裸眼立体ディスプレイ ELF-SR1¹⁵⁾は高品質の視線追跡と高出力のモニタを組み合わせることでこれらの問題を解決しているが、軽薄短小性が損なわれている。また、光学素子フィルム型立体視ディスプレイは映像が光学素子フィルムの向きに依存するため、頻繁に向きを変えて使用するモバイル端末には向きである。卓上のディスプレイや大型ディスプレイでの応用は期待できるが、携帯端末に対しては軽薄短小なデバイスで実現できる徳永らのシステムの方が有利である。

2.5 本論文の意義

本論文では、徳永らのシステムに新たに frame-break 効果を組み込む手法を提案する。また、frame-break の有無、および余白サイズの変化による立体感の変化について調査した結果を報告する。立体視に関する研究では、巨大なディスプレイや HMD を利用しているものが多く、立体視の普及には向かない。安価なディスプレイモニタと視点追跡用の web カメラを利用し、ソフトウェアによる拡張で手軽に立体映像を提示することを最終目的とした徳永らのシステムの性能を強化することで、安価で品質の高い立体視の実現を目指す。

3. システム

本章では frame-break を適用したシステム拡張について説明する。3.1 節で既存システムが裸眼立体視を実現する仕組みについて概説した後、3.2 節で同システムに frame-break を組み込む手法を述べる。

3.1 既存システム

徳永ら²⁾のシステムでは、作成済みの 3D シーンを入力するだけでディスプレイモニタ上に裸眼立体映像を表示可能である。このシステムにおける処理のフローを図 4 に示す。ディスプレイへの投影には、軸外投影法が採用されている。バーチャル空間上の合成カメラのビューボリュームが疑似的なディスプレイモニタを必ず通過するようにすることで、ユーザの視点位置から見た際のビューをディスプレイモニタに表示する。図 5(a) のようなディスプレイモニタを用いる場合、図 5(b) のようにバーチャル空間上に図 5(a) のディスプレイモニタと同じ大きさの面を作成する。バーチャル空間上の合成カメラのビューボリュームがこの疑似的なディスプレイモニタを必ず通過するようにする。この方法でレンダリングした結果が図 5(c) である。また、レンダリング結果(図 5(c))をディスプレイに表示し、ユーザの視点から撮影したものが図 5(a) である。これらのオブジェクトの位置関係は図 5(b) に

示されている。

このシステムではまず web カメラで取得したユーザの左眼・右眼の画像空間上の位置座標値を取得する。ここでは左眼・右眼の中間点を視点位置と仮定する。変換した座標値をバーチャル空間上の合成カメラの 3 次元位置座標値として利用する。その座標値は、web カメラから出力される画像の縦横の画素値と実空間上のディスプレイモニタの縦横の長さの比を利用して計算する。また、ユーザと web カメラ間の距離と、追跡対象として推定された領域の大きさの比を利用し、奥行きを算出している。このように、視点追跡を組み合わせることでユーザの目の位置に合わせて正常な投影像が見えるように常に映像を生成し、アナモルフォーシスを与えることで、ユーザの運動視差を誘発し裸眼立体視を実現している。

しかし、アナモルフォーシスは単眼性を仮定した技法であるため、両眼視差情報を提示することができず、ユーザが感じるプレゼンスを低下させてしまう可能性がある。そこで、仮想的な単眼であるサイクロープスの眼 (Cyclopean eye) の概念を応用し、両眼視差の影響を極小化した裸眼立体視を実現している。

サイクロープスの眼の位置を推定するために簡易なキャリブレーションを行う。まず、図 6 のように 2 画面に連続する直線が描かれた静止画を表示し、これが一直線に見える位置 (図 6(b)) にユーザに顔の位置を動かしてもらう。このとき、ユーザの視点はこの直線を含む平面上に存在すると考えられる。このときのユーザの両眼を結んだ直線と、画面に表示されている直線を含む平面の交点を求め、この交点にサイクロープスの眼があると推定する。そして、推定した位置から視線を追跡し、描画の更新を繰り返すことによって先鋭化されたアナモルフォーシスを維持し、両眼視差による立体感の低下が軽減できる²⁾。

3.2 frame-break の適用

frame-break は、あらかじめスクリーンの大きさに余裕をもたせておくことで、手前に飛び出すシーンにおいてオブジェクトを余っているスクリーンにも投影し、飛び出しているように錯覚させる手法である。画面の周囲に構成する、ユーザの視点から見た場合に本来の描画領域からはみ出した物体のみを描画する領域を、ここでは「余白」と定義する。余白部分は手前に飛び出したオブジェクトのみを描画するように設定する。このシステムで描画を行う際に、事前に固定の大きさの余白を設定することでシステムに frame-break を組み込んだ。余白を設定した状態での描画の様子を図 7 に示す。図 3(a) のようにオブジェクトが欠落せず、描画されている様子が確認できる。

余白のサイズが大きくなるほどオブジェクトが欠落する回数は減るが、描画領域が小さくなり没入感が下がる。本論文では frame-break 効果の影響に加え、このトレードオフについても調査する。

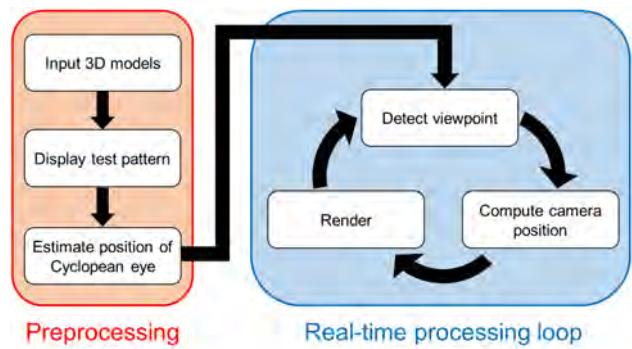


図 4 徳永ら²⁾の処理のループ

Fig. 4 The processing loop of the system proposed by Tokunaga et al.²⁾

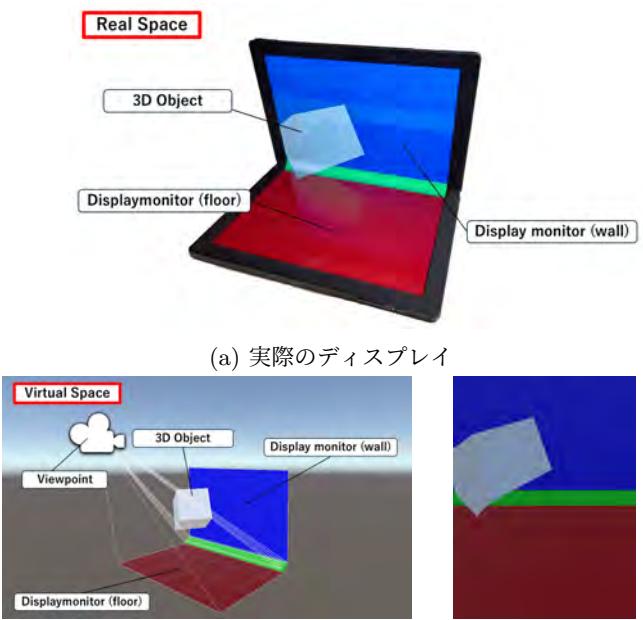


図 5 ディスプレイモニタとカメラ位置、および出力画像

Fig. 5 Relationship among display monitor, 3D object, and viewpoint

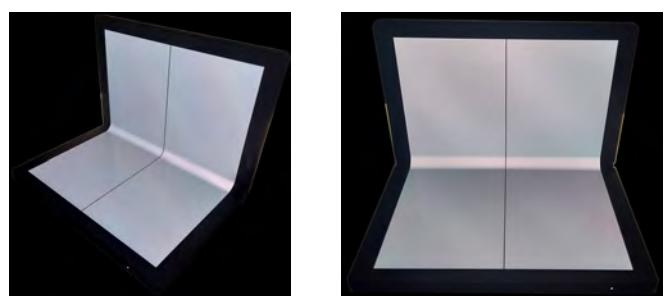


図 6 キャリブレーションに用いた画像を表示した様子。不適切な視点からは、直線が (a) のように見える。そこで、(b) のように見える位置に顔を動かしてもらうことでサイクロープスの眼の位置を推定する

Fig. 6 Calibration pattern on display monitors. Since the lines look like (a) from an improper view, the location of the Cyclopean eye is estimated by moving the user's face to a position where the lines are seen as in (b).

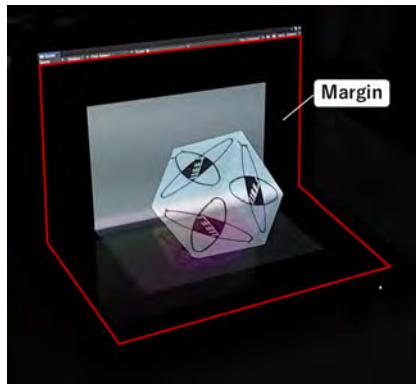


図 7 徳永ら²⁾のシステムに frame-break を適用した様子(余白サイズは 15)。赤枠は本来の描画領域

Fig. 7 A snapshot of system with frame-break effect (margin size = 15)

4. frame-break 効果の検証実験

本章では frame-break 効果の立体感への影響を確かめる実験について説明し、その結果を分析する。実験では、同じ余白サイズにおいて frame-break 効果の有無による立体感の変化と、異なる余白サイズにおいて frame-break 効果を適用した際の立体感の変化について調査した。

4.1 実験

実装および実験の環境として、プロセッサ: AMD Ryzen 7 3700X (3.60 GHz, 16 プロセッサ) CPU, GPU: GeForce RTX 2070 SUPER, 実装メモリ 64.0 GB) を用いた。壁面ディスプレイモニタとして、Dell U2720Q (27 型、表示領域: 596.7 mm × 335.7 mm、画素密度: 163 ppi)、床面ディスプレイモニタとして、EIZO FlexScan EV2750 (27 型、表示領域: 596.7 mm × 335.7 mm、画素密度: 109 ppi) を利用した。Web カメラとして、logicool webcam c910 を利用した。実験シーンは、Unity 2021.3.17f1 Personal¹⁷⁾を利用した。視点位置の取得には Google が提供している機械学習ライブラリ MediaPipe⁶⁾を利用した。また、ベゼルを隠すように 2 枚のディスプレイモニタの境界を黒いテープで覆った。実験環境の様子を図 8 に示す。

実験参加者は、CG・可視化を専門とする 20 代の大学生および大学院生 12 名であり、11 名が男性、1 名が女性である。どの実験参加者も、近距離であれば問題なく映像を視認できる視力を有していることは確認済みである。

今回の実験では余白の色を黒とした。これは後述する実験環境のベゼル部分が黒く、ベゼルとディスプレイモニタの境界を意識させないためである。余白の大きさを、画面幅に対する片側の余白領域の幅の比として定義した。余白の大きさが 50 のとき、左右合わせて 100 となり画面が余白で埋まり、描画領域が消失するため、これが最大値となる。

実験には、図 9 および補足資料の動画に示す 3 種類のシーンを用いた。Scene1 はクワガタのオブジェクトが配置された静的なシーン、Scene2 は飛行機がシーン内を飛び回る動的な



図 8 2 枚のディスプレイモニターで構成された実験環境。中央のつなぎ目は紙で覆い隠している

Fig. 8 Two display monitors with a shield piece of paper for the experiment

シーン、Scene3 は直方体が手前に飛び出してくれるよう動く動的なシーンである。これらの各シーンにおいて、余白の大きさを 0, 5, 15, 25 に変化させたもの、および余白の大きさ 15 (描画領域は元の画面の 0.7 倍 × 0.7 倍) で frame-break の効果を無効にしたものの合計 5 パターンの条件に対し、1 から 7 の 7 段階のリッカート尺度で立体感を評価してもらった。1 から 7 の基準としては以下の説明を行った。

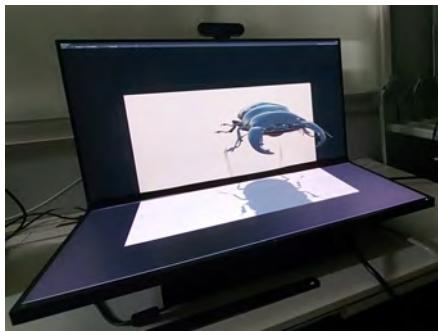
1. まったく立体的に見えない
2. あまり立体的に見えない
3. どちらかといえば立体的に見えない
4. どちらともいえない
5. どちらかといえば立体的に見える
6. やや立体的に見える
7. 立体的に見える

実験参加者には実験の目的を伝えたうえで実験を行った。実験の所要時間は 1 人 10 分前後であった。また、立体感は主観的なものであることから直観的に選ぶ旨とどちらともとれない選択肢は 3 から 5 回程度しか選ばないように伝えた。数値が大きいほど強い立体感を感じたことを表す。これら 3 種類のシーンと 5 パターンの余白を組み合わせた合計 15 種類のシーンは、ランダムな順に実験参加者に見せた。

参加者ははじめ、椅子に座った状態で頭をカメラから 50cm の位置にした状態でキャリブレーションを行うが、実験開始後は椅子に座った状態で自由に頭を動かしてもらった。

4.2 結果

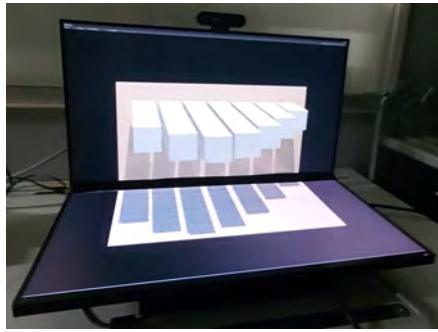
余白サイズに応じたシーンごとの評価の平均値と標準偏差を表 1 に示す。今回、立体感の評価に正規性が認められなかったため、ウィルコクソンの符号順位検定を用いて有意水準 0.05 の両側検定を行った。有意水準 0.05 の両側検定のとき、サインランク表によると、限界値は $n = 7$ で 2, $n = 10$ で 8 である。余白サイズ 15 の frame-break 効果有りと無しの評価 (サンプル数 12) に対して検定を行った結果、Scene1 は $n = 7$, $T = 0$, Scene2 は $n = 10$, $T = 2$, Scene3 は $n = 10$, $T = 2$ となり、いずれも限界値を下回り、有意水準 0.05 で有意差があるという結果となった。



(a) Scene1: 静止したクワガタのシーン



(b) Scene2: 飛行機が飛び回るシーン



(c) Scene3: 直方体が手前に飛び出るシーン

図 9 実験で用いた 3 種類のシーン

Fig. 9 Three scenes used in the experiment

次に、各シーンについて、余白サイズにより立体感の変化があるかどうかを確かめるため、フリードマン検定を行った。その結果、Scene1 は $p = 0.153$ 、Scene2 は $p = 0.084$ 、Scene3 は $p = 0.153$ となり、いずれも有意水準 0.05 で有意差が見られないという結果となった。Scene3 に対しては、オブジェクトの欠落が起こりやすく、適度に余白があるほうが立体感が低下しないという意見が寄せられた。

シーンごとの余白に応じた評価の順位をプロットしたものを図 10 に示す。数値が大きいほど立体感の評価が高かったことを示す。立体感の相対的な変化が重要であるため、実験参加者ごとに各シーンでの立体感の評価を順位付けし、その順位を箱ひげ図で示した。立体感が極大化する余白サイズが、Scene1 では 5%，Scene2 では 15%，Scene3 では 5% となっている。シーンによって、極大となる余白のサイズが異なることが確認できる。また、定性的な評価ではあるが、立体感の評価が極大化した余白サイズより大きくした場合、立体感は単調減少している。

表 1 余白サイズに応じたシーンごとの立体感の評価
Table 1 Evaluation of stereoscopic effect for scenes according to the margin size

Scene	Frame-break 余白サイズ	有					無 15
		0	5	15	25	15	
Scene1	AVG	4.25	5.42	4.58	3.58	3.33	
	SD	1.00	0.89	0.95	0.82	0.94	
Scene2	AVG	5.17	5.75	6.08	5.25	4.17	
	SD	1.07	0.94	0.51	0.55	0.96	
Scene3	AVG	4.92	6.25	6.08	5.42	4.08	
	SD	0.85	0.49	0.45	0.85	0.95	

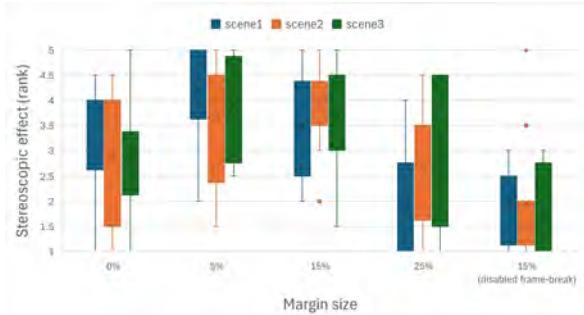


図 10 余白サイズに応じたシーンごとの評価の順位

Fig. 10 Ranks in scores when different margin sizes are applied to each scene

5. 考察

余白サイズ 15 の frame-break 効果有りと無しの検定結果から、frame-break 効果は立体感向上に寄与することが確認された。オブジェクトが画面端に到達した際に欠損する回数が減ったためと考えられるが、オブジェクトの欠落による立体感の低下ではなく、余白があることによる立体感の向上を指摘する意見がアンケートに見られた。余白があることにより描画部分と余白という境界が生まれ、オブジェクトがそれを越境することも立体感の向上に寄与している可能性がある。

次に、評価が最大となる余白サイズについては、シーンごとに異なる結果となった。評価の平均値が最大となる余白の大きさは Scene2 のみ異なっており、最適な余白の大きさはシーン依存性が高いと考えられる。また、Scene1, Scene2, Scene3 ともに余白サイズごとの立体感の評価について有意差は見られないという結果となった。定性的な評価になるが、立体感は余白サイズに対して単調増加しておらず、最適な余白の大きさがあると考えられる。傾向としては、いずれのシーンも評価が最大となる余白サイズ以下では余白サイズを大きくするに伴い単調増加、それ以上に大きくする場合は単調減少するよう立体感が変化している。これは余白が過剰であった場合、frame-break 効果よりも描画範囲が狭くなることによるシーンの品質低下の影響が大きくなっているからであると考えられる。それぞれのシーンにおいて立体感の平均が最大となる余白サイズの評価を基準として立体感の変化を見たところ、これは余白が過剰であった場合、frame-break 効果

よりも描画範囲が狭くなることによるシーンの品質低下の影響が大きくなっているからであると考えられる。最適な余白について議論するには、計測する余白サイズを増やすなど、より詳細なデータ分析が必要である。

6. 結論と今後の課題

本論文では、徳永らの裸眼立体視システム²⁾に対し「余白」を定義し frame-break 効果を組み込む手法を提案した。また、frame-break 効果および余白の大きさが立体感に与える影響について述べた。実験結果を分析したところ、画面の大きさを犠牲にしても、frame-break 効果はシステムの立体感の向上につながるという結論を得た。

今後は他のシーンにも frame-break 効果を適用した際の影響を調べ、実験データを増やす必要がある。frame-break 効果を適用することが効果的なシーンの特徴を分析し、また、静的なシーンにおいては、事前にシーンオブジェクトが欠落しない適切な大きさの余白を生成することで立体感の向上が図れる可能性がある。しかし、frame-break 効果を用いても、その余白からオブジェクトが大きくはみ出し一部が欠落した場合は立体感が低下する。動的なシーンや、投影範囲外から画面内へ移動するオブジェクトが避けられないシーンも想定され、これらの場合においてオブジェクトの一部が欠落することによる立体感の低下も課題である。投影範囲境界でのオブジェクトの消失に注意が向かないように映像を加工するなどの工夫が必要である。また、シーンの内容から最適な余白サイズを事前計算することでこの問題を改善できるとも考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、科研費挑戦的研究（萌芽）23K18468 の支援を受けて実施された。

参考文献

- 1) 3D アーティスト 永井秀幸 公式サイト 鉛筆/3D アート画家永井秀幸 — official site オフィシャルサイト, <https://nagaihideyukiart.jimdo.com/> (最終アクセス日: 2025-08-02) .
- 2) 徳永恵太, 長澤彦己, 藤代一成: “サイクロープスの眼: 直交配置マルチディスプレイを用いた裸眼立体映像生成のためのアナモルフォーシスの先鋭化”, 画像電子学会誌, Vol. 50, No. 4, pp. 550-557 (2021) .
- 3) 井阪建, 藤代一成: “L 字型表示面を用いた錯視による裸眼立体映像生成”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 70, No. 6, pp. J142-J145 (2016) .
- 4) IMAX, The IMAX Difference—IMAX, <https://www.imax.com/content/imax-difference> (latest access: 02/08/2025) .
- 5) 桑山哲郎: “アナモルフォーズによる3D映像がビルの屋上に出現”, 日本写真学会誌, Vol. 85, No. 1, pp. 1-2 (2022) .
- 6) MediaPipe — Google for Developers, <https://developers.google.com/mediapipe> (2023) .
- 7) P. Viola and M. Jones, “Robust Real-Time Face Detection”, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 57, No. 2, pp. 137-154, May 2004.
- 8) H. Helmholtz, *Handbuch der Physiologischen Optik*, 1866.
- 9) C. Carolina, D. Sandin, and T. DeFanti: “Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE”, *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 135-142 (1993) .
- 10) T. Ogi: “Characteristics of immersive projection displays and their applications”, *The Transactions of Human Interface Society*, Vol. 1, pp. 43-49 (1999) .
- 11) Meta, Meta Quest 3: New Mixed Reality VR Headset - Shop Now—Meta Store, <https://www.meta.com/jp/en/quest/quest-3/> (latest access: 02/08/2025) .
- 12) H. Ishikawa and H. Saito: “Point Cloud Representation of 3D Shape for Laser-Plasma Scanning 3D Display”, 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 1913-1918, November 2008.
- 13) I. Rakkolainen S. DiVerdi, A. Olwal, N. Candussi, T. Hüllerer, M. Laitinen, M. Piirto and K. Palovuori: “The Interactive FogScreen”, *ACM SIGGRAPH 2005 Emerging technologies*, p. 8, July 2005.
- 14) Nintendo, Nintendo 3DS Series—Nintendo, <https://www.nintendo.co.jp/hardware/3dsseries/index.html> (latest access: 02/08/2025) .
- 15) Sony, ELF-SR1—Spatial Reality Display—SONY, <https://www.sony.jp/spatial-reality-display/products/ELF-SR1/> (latest access: 02/08/2025) .
- 16) Lenovo, Introducing the Lenovo ThinkPad X1 Fold—Lenovo Tech Today US, <https://techtoday.lenovo.com/us/en/thinkpad/x1-fold> (latest access: 02/08/2025) .
- 17) Unity, Unity Real-Time Development Platform—3D, 2D VR & AR Visualizations, <https://unity.com/> (latest access: 02/08/2025) .

(2025年4月4日受付)

(2025年9月26日再受付)



徳永恵太

2020年慶應義塾大学理学部情報工学科卒業。現在、慶應義塾大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻博士課程に所属。立体映像の研究に従事。



藤代一成 (名誉会員)

1985年筑波大学大学院博士課程工学研究科電子・情報工学専攻修士号取得退学。1988年理学博士（東京大学）。東京大学助手、筑波大学助手・講師、お茶の水女子大学助教授・教授、東北大学教授を経て、2009年より慶應義塾大学理工学部情報工学科教授、現在に至る。ビジュアルコンピューティング、特にボリュームグラフィックスや可視化ライフサイクル支援、知的環境メディアに関する研究に従事。日本学術会議連携会員、IEEE Visualization Academy会員、日本工学会、情報処理学会フェロー。

物体識別を目的とした物体のインタラクション領域の取得手法

福 田 徹 平[†] 石 井 雅 樹[†](正会員) 堂 坂 浩 二[†]

[†]秋田県立大学

A Method for Acquiring Interaction Regions of Objects for Object Identification

Teppei FUKUDA[†], Masaki ISHII[†](Member), Kohji DOHSAKA[†]

[†] Akita Prefectural University

〈あらまし〉 アフォーダンスとは、環境が動物に提供する意味や価値のことである。物体を構成する面の素材や形状、配置等が、提供される意味や価値に関係するならば、物体を構成する要素がわかっている場合、それらを知覚した動物が物体に対して取る行動は絞り込まれる。逆に、動物の物体に対する行動が観測された場合、物体が提供する意味や価値を知ることができ、その基となる物体の形状などに関する情報も得ることができる。事前に物体の形状と提供される意味や価値が存在する領域に関する知識があるならば、物体の形状と提供された意味や価値が存在する領域を比べることで、同じアフォーダンスが潜在する物体かどうかを識別することができ、知識を蓄積していくことで物体識別が可能になると考える。本稿では物体識別を目的とした、物体に対する人の行動を観測し、行動の対象となった物体と提供された意味や価値が存在する領域の取得手法について述べる。

キーワード：物体識別、インタラクション、アフォーダンス

〈Summary〉 Affordances are the meanings and values that the environment provides to animals. If the material, shape, arrangement, etc. of the surfaces constituting an object are related to the meaning and value provided by the object, then if the elements constituting the object are known, the behavior of an animal that perceives these elements toward the object can be narrowed down. Conversely, when an animal's behavior toward an object is observed, the meaning and value provided by the object can be known, and information about the shape of the object, which is the basis of the behavior, can also be obtained. If we have prior knowledge of the shape of the object and the area where the provided meaning and value exist, we can compare the shape of the object and the area where the provided meaning and value exist to identify whether the same affordance is a potential object or not, and we consider that object identification will become possible by accumulating knowledge. This paper describes a method for object identification that observes human actions toward objects and acquires the objects that are the objects of the actions and the areas where the provided meanings and values exist.

Keywords: object identification, interaction, affordance

1. はじめに

近年、画像からの物体認識技術の進歩により、高精度な物体認識が可能となり、様々な分野で応用されている。一般的な画像からの物体認識では、画像のデータセットを用いて深層学習モデルを学習し推論する。この場合、推論可能な物体はデータセットに含まれる物体に類似した外観の物体に限られる。そのため、データセットに含まれない物体に対する推論精度については、十分な精度が得られない場合がある。多種多様な物体を認識するには、膨大なデータセットを作成し、

学習する必要がある。しかし、データセットの作成や学習には多大な労力とコストがかかるため、この手法では認識可能な物体の種類には限界がある。

人間は物体を見たとき、どのような物体かを視覚からの情報を基に認識している。仮に、見たことのない物体であっても、その物体の形状等から、その人の知識や経験に基づいて物体を識別し、物体が何であるかを推論することができるを考える。これは J. J. Gibson が提唱したアフォーダンスの概念に基づいている。アフォーダンスとは、環境が動物に提供する意味や価値のことであり、物体の面や形状、配置等が提

供される意味や価値を構成しており、これらを知覚することで、物体の提供する意味や価値であるアフォーダンスを知覚することになるとされている¹⁾。

ここで、物体を構成する面の素材や形状、配置等が、提供される意味や価値に関係すると仮定する。このとき、動物が物体に対して何かしらの行動を取った場合、その行動が物体の提供する意味や価値に起因するならば、物体の提供する意味や価値を知ることができる。提供する意味や価値は、物体を構成する要素に関係していることから、どのような物体を絞り込むことができると考える。

本研究は、画像から直接物体を認識するような従来手法とは異なり、物体の形状に関する情報と、物体が提供する意味や価値が存在する領域に関する情報を基に、人間の知覚に近い物体識別を行うことが目的である。本稿では、物体識別を目的とした、人の物体に対する動作のうち座る動作を基に、対象物の領域と、人と物体の相互作用、インタラクションが発生する領域（インタラクション領域）を取得する手法について述べる。

2. 関連研究

近年のロボット工学やコンピュータビジョン分野における、アフォーダンスに関する研究として Affordance Detection や Affordance Grounding がある。これらは、物体がどのような意味や価値を提供するかを検出、特定するタスクであり、Do らの研究²⁾では、リアルタイムでロボットを制御するために、画像から物体の提供する意味や価値として、grasp や cut, containなどを検出し、対象となる領域を推論する手法が提案されている。Chen らの研究³⁾では、手のインタラクションを動画から学習し、デモンストレーション動画から対象物の画像内のインタラクション領域を推論する手法が提案されている。これらの研究は、物体の提供する意味や価値を検出、特定することに焦点を当てているが、アフォーダンスの概念に基づいて、物体の形状等に関する情報を用いているかどうかは明確ではない。石井らの研究⁴⁾では、人間とのインタラクション検出に基づく物体認識に関する基礎検討が行われた。RGB-D カメラにより撮影した映像から、物体の形状に着目した静的属性と、人の物体に対する動作に着目した動的属性を用いて、床と椅子、飲み物の物体認識を行う実験が行われている。椅子の認識においては、床認識の後、床に平行な平面を椅子の座面とする平面認識を用いた認識が行われており、人の太ももが誤認識される場合や、椅子の領域を立方体とするような認識における制限がある。本研究では映像内における対象物の領域の誤認識や、対象物の領域の決定における課題に対し、人と対象物の領域を分け、異なる手法で処理することにより、得られる対象物領域の精度改善が期待される。

3. 手 法

映像内から人が物体に対してどのような行動を取ったかを観測し、その結果から、対象となる物体の特定と、物体のインタラクション領域を取得する手法を述べる。

3.1 概要

はじめに、映像から人の物体に対する動作を観測する。本稿で対象とする人の物体に対する動作は座る動作とし、対象物は人に座ることを提供する物体とする。次に、座る動作が観測された位置を基に、対象物と対象物内のインタラクション領域を取得する。これにより、対象物と物体識別に必要となる物体の形状や面の構成に関する情報を取得することができる。

3.2 動作認識

映像内の環境において、人が物体に座った状態（着座状態）を判定するために、推論した人の姿勢特徴点から、関節の角度、角速度、角加速度を特徴量として算出し、ランダムフォレストによる分類器を用いて、着座状態かどうかを判定する。人の姿勢特徴点は、BlazePose⁵⁾GHUM^{6),7)}3D の Heavy モデルを用いて推論し、座る動作において判断に必要となる左右の足首、膝、腰、肩の座標を取得する。また、座る動作が完了したかどうかを判断するため、足首と膝、膝と腰、腰と肩を結ぶベクトルを用いた特徴量を算出する。足首と膝、膝と腰のベクトルのなす角度、膝と腰、腰と肩のベクトルのなす角度、及びそれらのベクトルの角速度、角加速度を特徴量として算出する。ベクトル a と b のなす角度 $\theta(^{\circ})$ は、次の式 (1) で求められる。

$$\theta = \arccos \left(\frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|} \right) \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

求めた θ を用いて、動画の最初のフレームにおける角速度 ω_0 、角加速度 α_0 を 0 として、各フレームにおける関節の角速度、角加速度を求める。また、1つ前に算出した角度を θ_{k-1} 、またその時点のフレームを t_{k-1} 、現在のフレームにおける角度を θ_k 、また現時点のフレームを t_k とし、フレームレートを f としたとき、現時点における関節の角速度 ω_k は、次の式 (2) で求められる。

$$\omega_k = \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} f \quad (2)$$

同様にある時点 t_k の角加速度 α_k は、次の式 (3) で求められる。

$$\alpha_k = \frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} f \quad (3)$$

得られる 3 つのベクトルのうち隣接するベクトルに対する、なす角度、角速度、角加速度、計 6 つを左右でそれぞれ算出し、計 12 個の特徴量により、着座状態の学習を行う。着座

表1 着座状態判定の学習に用いるデータセット
Table 1 Dataset for sitting state judgment

状態	学習用	検証用	合計
着座状態	573	196	769
着座状態以外	3561	1182	4743
合計	4134	1378	5512

表2 着座状態判定の実験結果
Table 2 Experimental results of sitting state judgment

状態	Precision	Recall	F1-score
着座状態	0.9126	0.8520	0.8813
着座状態以外	0.9757	0.9865	0.9811

状態の学習では、座る物体の高さと種類を変更し、座る向きについても正面を 0° としたとき、左右に 90° まで、 45° ずつ変更した映像、計 23 件を用いて姿勢特徴点と着座状態の関係を学習する。学習には、決定木の本数は 100、ノードを分割する際のサンプル数が 2 未満になるまで学習することを条件とした、ランダムフォレストを用いる。データセットは各フレームを 1 つのデータサンプルとし、学習用と検証用の比率が 3:1 になるように分割し、学習を行う。表 1 に着座状態判定の学習に用いる、学習用・検証用データサンプル数を示す。

表 2 に着座状態判定の学習後の評価結果を示す。着座状態の精度が着座状態以外の判定精度よりも低いことから、着座状態を着座状態以外と誤判定する確率が高いことがわかるが、どちらも Precision が 0.9 を超えており、着座状態の判定は可能と考える。

3.3 人領域の取得

人の対象とする動作が観測された後、対象物を決定するが、映像では人と対象物が重なっている場合がある。そのため、人の領域を除外し、対象物の領域を取得する必要がある。十分な精度の人領域の取得のために 3 段階で処理を行う。人以外に映り込む背景や物体による姿勢特徴点への影響の抑制と、安定した姿勢特徴点の取得のために、はじめに YOLO11⁸⁾を用いて人を検出する。本実験では YOLO11 の YOLO11m を用いて人の矩形領域を得る。次に、得られた人の矩形領域の画像に対し BlazePose GHUM 3D を用いて姿勢特徴点を推定する。得られた姿勢特徴点のうち、人領域に含まれる点を、左右の腰、左右の肩の 4 点の中央の座標として、Segment Anything Model 2 (SAM2)⁹⁾に Point Prompt として、画像と共に入力する。図 1 に切り出した 1 人の矩形領域に対して、BlazePose GHUM での人領域の取得結果（図 1(a)）と BlazePose GHUM 3D により取得した姿勢特徴点から算出した人領域に含まれる点を Point Prompt として入力した際の SAM2 による人領域の取得結果（図 1(b)）を示す。人の矩形領域に対して BlazePose GHUM を用いた場合では、人領域周辺にノイズが確認できるが、BlazePose GHUM 3D と SAM2 を組み合わせた場合では良好な人領域の取得が可



(a)



(b)

図 1 人領域の取得結果 (a)BlazePose GHUM での出力、(b)BlazePose GHUM 3D により取得した姿勢特徴点から算出した人領域に含まれる点を Point Prompt として入力した際の SAM2 の出力

Fig. 1 Results of human-region acquisition: (a) Output from BlazePose GHUM, and (b) Output of SAM2 when the points contained in the human region, calculated from pose keypoints obtained with BlazePose GHUM 3D, were used as point prompt

能であることがわかる。

3.4 物体領域の取得

人が座る動作を行った際の対象物の決定では、3.2 節で述べた着座状態の判定を行い、着座状態であると判定された場合、左右の腰の中央にあたる座標を配列に格納する。配列に格納された初めの座標を Point Prompt として、RGB 画像に対し SAM2 を用いて対象物の領域を推論し、得られた領域のうち、テクスチャや対象物の一部の色が異なる場合などを考慮し、面積が最大となる領域を対象物の領域とする。配列に格納された残りの座標について、対象物の領域に含まれる座標を除外した後、同様に対象物の領域を推論する。これにより、人が複数の物体に対して座る動作を行った場合でも、対象物の領域を取得することが可能となる。

3.5 物体のインタラクション領域の取得

インタラクション領域の取得では、物体の形状を考慮したインタラクション領域が取得されることが望ましい。そこで、RGB 画像に対して Metric3Dv2 を用いた物体表面における法線ベクトルの推定を行い、物体表面の法線ベクトルに対して、3.4 節で取得した姿勢特徴量の座標を格納した配列を基に、各物体のインタラクション領域を決定する。

4. 実験

4.1 実験条件

本実験ではより一般的な環境での物体識別を目的として、RGB-D カメラではなく、RGB カメラを用い、深度推定と物体表面における法線ベクトルの推定を行う。対象物が常に人領域と完全に重なり処理ができない条件を考慮し、1 つの動作に対して 2 方向から映像を撮影する。ただし、本実験では 1 つの動作に対して 2 方向のうち 1 方向の映像のみを用いて処理しており、深度と法線ベクトルについても 1 方向の映像のみから单眼で推定しており、ステレオ法などを用い

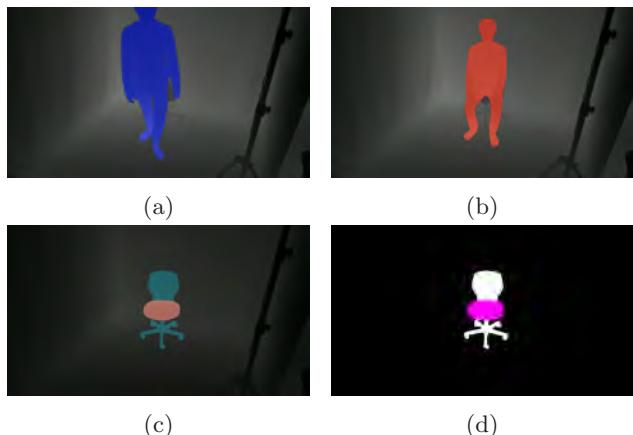


図 2 映像からの (a) 着座状態判定 (着座状態以外), (b) 着座状態判定 (着座状態), (c) 対象物及びインタラクション領域取得, (d) 同 マスク画像

Fig. 2 Procedure for (a) Judgment of sitting state (non-sitting), (b) Judgment of sitting state (sitting), (c) Detection of object and interaction regions, and (d) Corresponding mask image

ているわけではない。RGB カメラには Canon EOS RP と Canon EOS R10 を用いた。Canon EOS RP の焦点距離は 24mm, Canon EOS R10 は Canon EOS RP のイメージセンサーサイズと異なるため、同じ画角とするために焦点距離は 16mm とした。人と対象物が写るよう、床面からの高さ 1.67m, カメラから物体までの水平距離は 2.50m, カメラは下方向に 25° 傾けて設置した。映像は Canon EOS RP では 1920 × 1080pixel, 29.97fps, Canon EOS R10 では 3840 × 2160pixel, 29.97fps で 1 つの動画につき 10 秒前後、1 人のみが映り込むように撮影した。深度及び物体表面における法線ベクトルの推定には、Metric3Dv2¹⁰⁾の ViT-L モデルを用い、用いたカメラの焦点距離に合わせ、深度情報に対してリスケール処理を加えた。

4.2 実験結果

図 2 に映像からの着座状態判定及び対象物の領域取得手順を示す。図 2(a), 図 2(b) は動画内の人領域とその人の着座状態の判定結果を色で示しており、図 2(a) では着座状態ではないと判定され、図 2(b) では着座状態と正しく判定されている。図 2(c) に映像内の対象物の領域及びインタラクション領域、図 2(d) に最終的に得られる対象物の領域及びインタラクション領域のマスク画像を示す。

図 3 に物体表面における法線ベクトルを基に色付けした点群を示す。図 4 に映像中から取得した対象物の領域及びインタラクション領域の点群を示す。

5. 考 察

物体が提供する意味や価値を認知した人が行動を誘発され、実際に行った行動として座る動作が行われた場合、人が座ることを提供する物体の領域と、物体のインタラクション領域



図 3 人の座る動作を基に抽出した物体領域に対し、推論した物体表面における法線ベクトルを基に色付けした点群

Fig. 3 Point cloud colored based on the normal vector on the inferred object surface extracted based on the action of sitting



図 4 人の座る動作を基に抽出した物体領域 (グレー)、インタラクション領域 (マゼンタ) の点群

Fig. 4 Point cloud of object region (gray) and interaction region (magenta) extracted based on the action of sitting

を取得することができたと考える (図 4(a), 図 4(b))。図 4(c) の机のように、座ることが可能な物体に対し、座った場合においても物体の領域とインタラクション領域を取得することが可能であることがわかる。図 4(c) では、折り畳み式の机であったため、机の天板が中央で折りたたむためのヒンジ部の存在により想定したインタラクション領域の半分のみが取得されているが、インタラクション領域としては正しい領域を取得できている。

6. む す び

本研究では、人の物体に対するインタラクションを観測することにより、物体識別を行うことを目的としている。本稿では、人の物体に対する動作のうち座る動作を基に、対象物の領域とインタラクション領域を取得する手法について述べた。人領域の取得では、複数段階の処理を行っており、実験より人領域の取得は可能であることを示したが、精度の評価については今後の課題である。今後は、認識する物体に対する人の動作の種類を増やし、取得した物体の形状や面の構成について推論した物体表面における法線ベクトルと、物体のインタラクション領域を用いて、物体識別に応用する予定である。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K12078 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) J. J. Gibson: "The Ecological Approach to Visual Perception Classic Edition", Psychology Press, p.119 (1986).
- 2) T.-T. Do, A. Nguyen, I. Reid: "AffordanceNet: An End-to-End Deep Learning Approach for Object Affordance Detection", International Conference on Robotics and Automation (2018).
- 3) J. Chen, D. Gao, K. Lin, M. Shou: "Affordance Grounding from Demonstration Video to Target Image", IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 6799–6808 (2023).
- 4) 石井雅樹, 石島樹, 藤野慎也: “人間とのインタラクション検出に基づく物体認識に関する基礎検討”, 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol. 30, No. 5, pp. 675–681 (2018).
- 5) V. Bazarevsky, I. Grishchenko, K. Raveendran, T. Zhu, F. Zhang, M. Grundmann: "BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking", CVPR Workshop on Computer Vision for Augmented and Virtual Reality, Seattle, WA, USA (2020).
- 6) H. Xu, E. Gabriel Bazavan, A. Zanfir, B. Freeman, R. Sukthankar, C. Sminchisescu: "GHUM & GHUML: Generative 3D Human Shape and Articulated Pose Models", IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Oral), pp. 6184–6193 (2020).
- 7) I. Grishchenko, V. Bazarevsky, A. Zanfir, E. G. Bazavan, M. Zanfir, R. Yee, K. Raveendran, M. Zhdanovich, M. Grundmann, C. Sminchisescu: "BlazePose GHUM Holistic: Real-time 3D Human Landmarks and Pose Estimation", arXiv preprint arXiv:2206.11678 (2022).
- 8) G. Jocher, J. Qiu: "Ultralytics YOLO11", <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (2024).
- 9) N. Ravi, V. Gabeur, Y.-T. Hu, R. Hu, C. Ryali, T. Ma, H. Khedr, R. Rädle, C. Rolland, L. Gustafson, E. Mintun, J. Pan, K. V. Alwala, N. Carion, C.-Y. Wu, R. Girshick, P. Dollár, C. Feichtenhofer: "SAM 2: Segment Anything in Images and Videos", arXiv preprint arXiv:2408.00714 (2024).
- 10) M. Hu, W. Yin, C. Zhang, Z. Cai, X. Long, H. Chen, K. Wang, G. Yu, C. Shen, S. Shen: "Metric3d v2: A versatile monocular geometric foundation model for zero-shot metric depth and surface normal estimation", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (2024).



福田 徹平

2023年秋田県立大学システム科学技術学部情報工学科卒業. 2025年同大大学院システム科学技術研究科博士前期課程修了. 画像処理, 機械学習を用いた研究に従事.



石井 雅樹 (正会員)

1997年秋田大学鶴山学部情報工学科卒業. 1999年同大大学院博士前期課程修了. 2008年同大大学院博士後期課程修了. 同年秋田県立大学システム科学技術学部助教. 准教授を経て, 2023年同大システム科学技術学部教授. 博士(工学). 画像処理, 機械学習応用に関する研究に従事.



堂坂 浩二

1984年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業. 1986年同大大学院修士課程修了. 同年日本電信電話株式会社入社. 2012年秋田県立大学システム科学技術学部教授. 博士(情報科学). 自然言語処理, 対話システムに関する研究に従事.

メッシュのスペクトル処理を用いた位置ベースダイナミクスの高速化

飛鳥井 翠[†] 菊池 知世^{††} 金井 崇^{††}(正会員)

[†]東京大学教養学部, ^{††}東京大学大学院総合文化研究科

Spectral Mesh Processing for Accelerating Position-Based Dynamics

Midori ASUKAI[†], Tomoyo KIKUCHI^{††}, Takashi KANAI^{††}(Member)

[†]The University of Tokyo, Collage of Arts and Sciences,

^{††}The University of Tokyo, Graduate School of Arts and Sciences

〈あらまし〉 本研究では、物理シミュレーションにおける計算高速化を目的とし、特に位置ベースのシミュレーションにおいて、スペクトル分解を用いたメッシュデータの効率的な並び替え手法の効果を検証する。メッシュのグラフラプラシアンにおけるフィードラーベクトル（2番目に小さい固有値に対応する固有ベクトル）は幾何学的に近い頂点をまとめる性質で知られており、これまで、力学ベースの手法において、フィードラーベクトルを用いたデータ並び替え手法が効果を示してきた。本研究では、この手法を位置ベースダイナミクスに応用し、効果を検証した。

キーワード：位置ベースダイナミクス、スペクトル分解、フィードラーベクトル

〈Summary〉 This paper aims to accelerate computations in physics-based elastic simulations, particularly in position-based dynamics, by investigating the effectiveness of an efficient mesh reordering method based on spectral decomposition. The Fiedler vector, which corresponds to the eigenvector associated with the second smallest eigenvalue of a mesh's graph Laplacian, is well-known for its ability to group geometrically close vertices. Reordering methods that utilize the Fiedler vector have demonstrated their effectiveness in force-based approaches. In this research, we extend this method to position-based dynamics and evaluate its performance.

Keywords: position based dynamics, spectral decomposition, fiedler vector

1. はじめに

物理シミュレーションにおける数値計算では、収束が安定で高速な計算手法の開発や、効率的な離散化手法の開発が進められてきた。しかし、これらの手法は、開発の難易度が高く、実装も膨大になる。より実装が容易で、多様な計算手法に応用が可能な高速化の方法として、キャッシュ効率を向上させるためにシミュレーションに使用されるオブジェクトデータを並び替える手法が挙げられる。計算の際には隣接する頂点座標に頻繁にアクセスするため、計算に使用する頂点座標がキャッシュに既に載っている状態を増やすようなデータ構造を採用すれば、データアクセスにかかる時間を削減でき、計算の高速化が期待できる。本研究では、Flor¹⁾が力学ベースの有限要素法や Projective Dynamics (PD) で高速化を実現したメッシュデータの並び替え手法が、位置ベースのシミュレーション手法である、Position Based Dynamics (PBD)²⁾においても高速化に寄与するかを検証する。

2. 関連研究

2.1 キャッシュ効率化

キャッシュ効率を向上させる手法は、大きく2つに分類できる。1つは、キャッシュサイズやキャッシュライン、階層などの、使用するキャッシュ固有のパラメータに依存する方法である。例えば、Hong ら³⁾は、キャッシュドメインに基づいてタスクをスケジューリングする手法を提案している。もう1つは、キャッシュの情報を使用せずにキャッシュミスの削減を目指す方法（キャッシュ忘却アルゴリズム）であり、Frigo ら⁴⁾がその最初の手法を示している。最も単純なキャッシュ忘却手法は、データの格納方法を計算手法に合わせて最適化し、キャッシュミスを減らすことである。この方法は、アルゴリズムを設計するよりも汎用性が高く、複数の処理に適用して高速化を実現できる。Yoon ら⁵⁾は、幾何学処理アルゴリズムにおける、キャッシュ効率を向上させるためのメッシュレイアウトを考案した。

2.2 幾何処理におけるスペクトル法

メッシュ処理及び解析の手法として、メッシュをグラフとして表現し、固有値や固有ベクトルを用いて特徴を抽出する手法は広く知られている。これらの手法はメッシュ圧縮やスムージング、電子透かしなどの技術にそれぞれ応用されてきた。その基本的な手法や応用の可能性については、Zhangら⁶⁾がまとめている。特に、ラプラシアン行列の2番目に小さい固有値であるフィードラーベクトルは、ラプラシアン行列から特徴を抽出する際に頻繁に用いられる。応用例としては、並列化計算の際のグラフ分割⁷⁾や、メッシュのセグメンテーション⁸⁾などが挙げられる。

3. スペクトル分解によるメッシュデータの並び替え

本章では、本論文で用いたスペクトル分解によるメッシュデータの並び替え手法を説明する。

3.1 メッシュのスペクトル分解

メッシュの頂点の数を n とすると、メッシュ構造は n 個の頂点を持つ無向グラフ $G = (V, E)$ で表すことができる。ここで、 V はノードの集合であり、 $V = \{0, 1, \dots, n-1\}$ 、 E はエッジの集合である。ノード i からノード j をつなぐエッジが存在するとき、 $(i, j) \in E$ である。このとき、グラフは行列を用いることで、代数的に扱うことが可能になる。特に、隣接行列やラプラシアン行列の固有値や固有ベクトルを利用することで、そのグラフの特徴を把握することができる。ラプラシアン行列 L は、ノード i の次数を d_i として、以下のように定義される。

$$L_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{if } (i, j) \in E, \\ d_i & \text{if } i = j, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

3.2 フィードラーベクトル

ラプラシアン行列において、2番目に小さい固有値に対応する固有ベクトルは、特にフィードラーベクトルと呼ばれる。 n 個の頂点を持つグラフについて、ラプラシアン行列 L の n 個の固有値は

$$0 = \lambda_0 < \lambda_1 < \dots < \lambda_{n-1}, \quad (2)$$

と表される。フィードラーベクトル V_1 は2番目に小さい固有値 λ_1 に対応する固有ベクトルであり、

$$V_1 = [v_0, v_1, \dots, v_{n-1}], \quad (3)$$

である。フィードラーベクトルのベクトル成分を各ノードに対応させたとき、グラフ上で近接するノード同士は、フィードラーベクトルの値も近くなることが知られている¹⁾。

3.3 フィードラーベクトルによるメッシュ並び替え

本研究でシミュレーションに使用したメッシュデータは、頂点リストと四面体リストのデータから構成されており、頂

点リストには各頂点の座標が、四面体リストには各四面体を構成する4つの頂点インデックスが格納されている。頂点及び四面体に対し、それぞれグラフラプラシアンを作成し、フィードラーベクトルの順序に沿って並び替えを行う。頂点リストから作成するグラフでは、頂点をノード、頂点同士の接続をエッジとする。一方、四面体リストから作成するグラフでは、四面体インデックスをノード、四面体同士の接続をエッジとする、いわゆる双対グラフを用いる。エッジの重みは一律1とし、差を設けない。

フィードラーベクトルの計算及び順序の並び替えには、Python を使用した。フィードラーベクトルの計算には、固有値や固有ベクトルの計算によく用いられる局所最適ブロック前処理共役勾配法 (Locally Optimal Block Preconditioned Conjugate Gradients, LOBPCG) を採用した⁹⁾。この手法では、固有ベクトルの初期推測値を入力する必要があるが、Florら¹⁾と同様に $\frac{1}{n}$ (n は頂点数) を使用した。

4. 実験と考察

4.1 単体のモデルに対する様々なシーンでの検証

本実験では、頂点数 51,264、四面体数 176,463 の Armadillo モデルを用いた。元データに加え、(1) 頂点のみフィードラーベクトル順序で並び替え、(2) 頂点と四面体をフィードラーベクトル順序で並び替え、(3) 頂点のみランダム順序、(4) 頂点と四面体をランダム順序にした計5種類のデータセットを作成し、オープンソースの PBD ライブラリ¹⁰⁾でシミュレーションを行った。元のデータ構造がある程度最適化されている可能性があるため、ランダムに並び替えたデータを用意し、フィードラーベクトル順序で並び替えたデータとの比較を行うことで、並び替えの効果を検証した。シミュレーションは、落下 (シーン1)、床との衝突 (シーン2)、物体同士の衝突 (シーン3) の3場面で実施し (図1)、シーン1,2は1,500ステップ、シーン3は衝突により計算が破綻するため500ステップで打ち切った。1ステップあたりの平均計算時間を Chrono ライブラリで測定した。環境は Intel Core i7-8700 (6コア 12スレッド)、メモリ 32GB のPCである。

元のコードでは四面体単位の並列処理を行っていたため効果は4%程度にとどまったが、本研究では並列処理を無効化し、矛盾や破綻なく計算を実行できた。その結果、頂点制約の計算でも並び替えの効果を確認できた。本論文で示す結果はすべて並列化を無効にして得られたものである。

結果を表1, 2, 3に示す。すべてのシーン・オブジェクトについて計測を行い (表1)、ランダム順序に対するフィードラーベクトル順序の高速化率を算出した (表3a)。さらに、衝突判定の詳細を測定し、高速化の要因を特定した (表2, 3b)。

4.2 複数のモデルによる統計的検証

前節の結果の信頼性を強化するため、シーン2における追加の統計的検証を行った。以降の計算はすべて、CPU に 8

表 1 1ステップで各処理にかかった時間 (ms)

Table 1 Processing time for each step (ms)

シーン 1	時間積分	制約投影計算	速度更新	衝突判定	合計
ノーマル	0.436	25.54	0.240	46.54	184.1
頂点ランダム	0.433	25.15	0.238	48.52	183.4
頂点/四面体ランダム	0.431	27.05	0.237	54.04	198.5
頂点フィードラー	0.434	24.30	0.239	46.58	177.3
頂点/四面体フィードラー	0.432	22.89	0.248	46.53	170.2

シーン 2	時間積分	制約投影計算	速度更新	衝突判定	合計
ノーマル	0.450	33.51	0.249	48.42	226.9
頂点ランダム	0.454	30.50	0.249	48.67	210.7
頂点/四面体ランダム	0.444	33.44	0.250	55.12	231.8
頂点フィードラー	0.441	30.95	0.248	47.79	212.6
頂点/四面体フィードラー	0.438	26.92	0.252	46.50	191.7

シーン 3	時間積分	制約投影計算	速度更新	衝突判定	合計
ノーマル	1.439	82.60	0.757	98.02	545.3
頂点ランダム	1.452	83.34	0.752	197.4	648.8
頂点/四面体ランダム	1.427	90.13	0.731	219.5	704.5
頂点フィードラー	1.399	78.48	0.737	183.8	610.5
頂点/四面体フィードラー	1.438	70.79	0.780	202.9	591.8

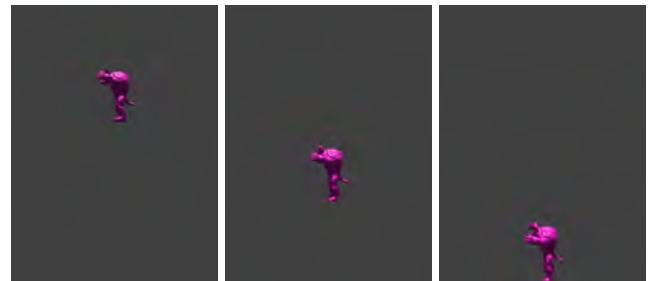
表 2 衝突判定の内訳 (ms)

Table 2 Breakdown of collision detection (ms)

シーン 1	頂点 BVH 更新	四面体 BVH 更新	衝突判定	合計
ノーマル	3.187	43.07	5.389×10^{-4}	46.46
頂点ランダム	3.356	44.28	4.684×10^{-4}	47.84
頂点/四面体ランダム	3.324	49.49	4.206×10^{-4}	53.02
頂点フィードラー	2.904	42.44	3.850×10^{-4}	45.56
頂点/四面体フィードラー	2.910	41.87	5.435×10^{-4}	44.99

シーン 2	頂点 BVH 更新	四面体 BVH 更新	衝突判定	合計
ノーマル	3.240	43.20	5.326×10^{-2}	46.70
頂点ランダム	3.393	44.06	5.464×10^{-2}	47.71
頂点/四面体ランダム	3.418	50.04	5.422×10^{-2}	53.72
頂点フィードラー	2.992	42.60	5.256×10^{-2}	45.86
頂点/四面体フィードラー	2.998	42.39	5.753×10^{-2}	45.67

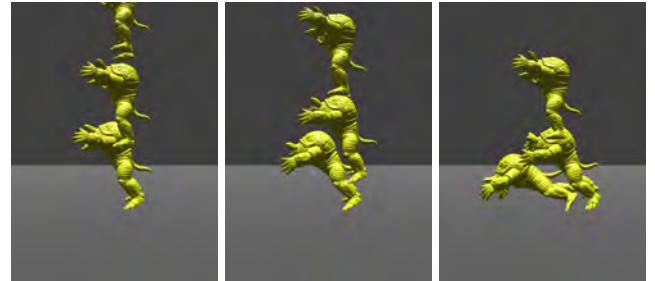
シーン 3	頂点 BVH 更新	四面体 BVH 更新	衝突判定	合計
ノーマル	2.551	40.50	63.97	193.7
頂点ランダム	2.641	41.03	278.9	410.4
頂点/四面体ランダム	2.640	46.81	272.8	421.7
頂点フィードラー	2.307	39.30	250.8	376.2
頂点/四面体フィードラー	2.295	38.98	273.6	398.0



(a) オブジェクト 1 体の落下 (シーン 1)



(b) オブジェクト 1 体の床との衝突 (シーン 2)



(c) オブジェクト 3 体の衝突 (シーン 3)

図 1 四面体メッシュシミュレーションの様子

Fig. 1 Visualization of tetrahedral mesh simulation

表 3 各処理項目の高速化率 (%): (a) PBD, (b) 衝突処理

Table 3 Speedup ratio of each processing stage (%):

(a) PBD, (b) Collision handling

シーン	時間積分	制約投影計算	速度更新	衝突判定	合計
シーン 1	頂点のみ	+0.29	-3.36	+0.49	-4.00
	頂点・四面体	+0.17	-15.40	+4.92	-13.89
シーン 2	頂点のみ	-2.98	+1.48	-0.36	-1.81
	頂点・四面体	-1.43	-19.49	+0.68	-15.64
シーン 3	頂点のみ	-3.66	-5.83	-1.95	-6.86
	頂点・四面体	+0.79	-21.45	+6.68	-7.55

(a)

シーン	頂点 BVH 更新	四面体 BVH 更新	衝突判定	合計
シーン 1	頂点のみ	-13.45	-4.15	-17.82
	頂点・四面体	-12.43	-15.41	+29.22
シーン 2	頂点のみ	-11.81	-3.32	-3.80
	頂点・四面体	-12.27	-15.27	+6.10
シーン 3	頂点のみ	-12.65	-4.22	-10.09
	頂点・四面体	-13.06	-16.73	+0.31

(b)

コア 16 スレッドの Intel Core i9-11900, メモリ 64GB の PC を用いた。使用モデルは Armadillo に加え, Stanford Bunny (2,605 頂点/8,245 四面体), Octopus (3,392 頂点/12,948 四面体), Tentacle Ball (160,096 頂点/373,823 四面体), および Moai (37,445 頂点/121,475 四面体) である。図 2 には, 左から順に Stanford Bunny, Octopus,

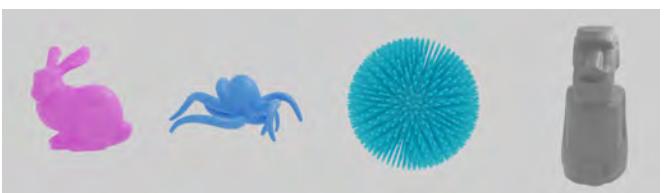


図 2 検証に使用したモデル

Fig. 2 Models used for validation

表 4 Armadillo モデルを用いた統計的検証

Table 4 Statistical validation using the Armadillo model

シーン 2	平均実行時間	標準偏差
頂点ランダム	58.359 ms	0.019
頂点/四面体ランダム	64.002 ms	0.215
頂点フィードラー	56.050 ms	0.0927
頂点/四面体フィードラー	51.185 ms	2.833

Tentacle Ball, Moai を示している。各モデルについて, 頂点/四面体のランダム順序とフィードラー順序の間に平均実行時間の有意差があるかを, 等分散を仮定しない Welch の t 検定で評価した。

Armadillo モデルを用いた結果を表 4 に示す。頂点ランダムと頂点フィードラーの間では p 値が 1.3×10^{-6} となり, 頂点/四面体ランダムと頂点/四面体フィードラーの間では p

表 5 各モデルを用いた統計的検証

Table 5 Statistical validation using each model

シーン 2		平均実行時間	標準偏差	p 値
Stanford Bunny	頂点/四面体ランダム	2.122 ms	0.0206	0.0207
	頂点/四面体フィードラー	2.042 ms	0.0514	
Octopus	頂点/四面体ランダム	3.474 ms	0.0688	0.00215
	頂点/四面体フィードラー	3.284 ms	0.0245	
Tentacle Ball	頂点/四面体ランダム	178.56 ms	4.137	0.00377
	頂点/四面体フィードラー	167.58 ms	4.453	
Moai	頂点/四面体ランダム	45.165 ms	1.466	0.00091
	頂点/四面体フィードラー	40.786 ms	1.144	

表 6 制約別平均実行時間 (ms)

Table 6 Average execution time per constraint (ms)

シーン 2	頂点/四面体ランダム	頂点/四面体フィードラー
距離制約	2.060	1.698
三角形面積制約	0.0510	0.0346
三角形面積・曲げ制約	0.120	0.090
四面体体積制約	2.654	2.227

表 7 制約別統計的検証

Table 7 Statistical validation by constraint

シーン 2	p 値	95%信頼区間
距離制約	2.1×10^{-6}	[- 0.431 ms, - 0.293 ms]
三角形面積制約	3.3×10^{-4}	[- 0.02179 ms, - 0.01112 ms]
三角形面積・曲げ制約	2.9×10^{-3}	[- 0.04264 ms, - 0.01640 ms]
四面体制約	3.6×10^{-4}	[- 0.541 ms, - 0.313 ms]

値が 3.6×10^{-4} となった。いずれの p 値も 0.05 よりはるかに小さく、統計的に非常に有意な差があることが示された。

同様に、他のモデルにおいても、表 5 に示されている通り、p 値はいずれも 0.05 未満となり、頂点数によらず、フィードラーベースの手法はランダムサンプリング手法と比較して実行時間を統計的に有意に短縮できる。なお、各 p 値は、ランダムの行に記載している。

4.3 制約別の性能評価

Armadillo モデルを用いて、異なる制約条件がシミュレーションの性能にどのように影響するかを評価した。PBD では、モデルの弾性体変形を制御するために、様々な制約が導入される。ここで評価する制約は、関与する頂点数に応じて 4 種類の代表的な幾何学的制約を選択した。すなわち、辺の端点 2 点が関わる距離制約、三角形の 3 頂点が関わる三角形面積制約、隣接する三角形の 4 頂点が関わる曲げの制約、及び四面体の 4 頂点が関わる四面体体積制約である。

結果を表 6 に示す。すべての制約において、フィードラー順序に並び替える手法の方が、より高速に処理を行えることがわかる。これらの実行時間の差が統計的に有意かどうかを、Welch の t 検定を用いて検証した結果を表 7 に示す。すべての制約において p 値は非常に小さく、統計的に非常に有意な実行時間の差があることが示されている。さらに、四面体制約における 95% 信頼区間は、他の制約と比較して実行時間の改善幅が最も大きいことを示しており、頂点/四面体フィードラーが四面体制約に対して特に有効であることが示された。

表 8 Armadillo モデルを用いた PD での平均実行時間 (ms)

Table 8 Average execution time with PD using the Armadillo model (ms)

	グローバル処理	ローカル処理
頂点/四面体ランダム	34.986	54.059
頂点/四面体フィードラー	33.767	46.325

4.4 Projective Dynamics の詳細評価と比較

Projective Dynamics (PD)¹¹⁾は、PBD のローカル処理に加えてグローバルな処理を行う手法であり、PBD を包括する手法であるが、先行研究においては詳細な分析が行われていなかった。そこで、Armadillo モデルを用いて、衝突シーンに対する検証結果を表 8 にまとめた。この結果から、ローカル処理においては約 7.7 ms の改善が見られた一方で、グローバル処理では約 1.2 ms の改善にとどまっていることが示され、ローカル処理における性能向上が明らかとなった。この傾向は PBD においても同様である。PBD は、グローバルな連立方程式を解く PD とは異なり、ローカルな処理が支配的となる。したがって、これまでの実験結果は、PBD が持つローカル処理中心の特性と、フィードラー順序による提案手法がローカル処理において特に高い効果を示すという知見が、PBD 環境下での性能向上に直結しており、かつ、その効果が幾何学的な制約特性に依存しないことを実証している。

また、衝突シーンに関する既存研究¹⁾の PD における適用例では、円柱のような単純な形状との衝突処理にとどまっていた。対照的に、本検証で使用した PBD ライブラリでは、複雑で正確な衝突処理に必要となる BVH の更新が含まれている。そのため、正確な衝突処理環境下において、提案手法が明確な効果を示すことを確認できた。これは、より汎用的なシミュレーション環境、特に複雑な形状を持つオブジェクト間で正確な衝突応答が求められるようなシナリオにおいて、提案手法が有効であることを示す新たな知見である。

4.5 考察

4.5.1 頂点制約投影計算

位置ベースにおける頂点の制約投影計算では、式 (4) の計算が行われる²⁾。

$$\Delta p = -\frac{C(p_1, \dots, p_n)}{\sum_j w_j |\nabla_{p_j} C(p_1, \dots, p_n)|^2} w_i \nabla_{p_i} C(p_1, \dots, p_n). \quad (4)$$

これは、1 つの頂点の制約を計算する際に、制約に関連する別の頂点を使用して計算が行われることを意味する。すなわち、フィードラー順序で並び替えることにより、関連する頂点データが連続して格納されるため、使用する頂点データがキャッシュに載っている状態が頻繁に発生する。また、ステップごとにすべての頂点について反復的に計算が行われるため、全体の計算時間に占める割合が大きく、並び替えによる効果も大きいと考えられる。

頂点のみを並び替えた場合よりも、頂点と四面体両方を並び替えた場合の方が効果が高かったのは、今回使用した制約が四面体単位であることによると考えられる。

また、シーン3では約21%と最も高い効果が得られたが、これは、落下のみでほとんどオブジェクトの変形が生じないシーン1に比べ、衝突による大きな変形が発生するシーン3では制約投影計算が繰り返される回数が多いためと考えられる。イテレーション数はすべて10回に設定しているが、変形に対する位置補正の勾配が非常に小さいとき、すなわち変形がほとんど見られない場合は、処理を打ち切る。

4.5.2 衝突判定

BVHの更新において並び替えの効果が得られた。使用したソフトウェアでは、BVHの要素（頂点や四面体）をそれぞれ木構造で管理している。各ステップごとに、頂点座標の更新に応じてBVHを再計算する際、探索が行われる。BVHの木構造は、すべての要素がノードに振り分けられるまで空間を再帰的に2分割し続けることで構築され、隣接要素が近くの葉に格納される。この隣接要素をまとめる木構造と、フィードラー順序によるメッシュの並び替えは非常に相性が良く、その結果、並び替えの効果が得られたと考えられる。

BVHの更新は、PBD手法に依存しない汎用的な手法であるため、BVHを基盤とする他の様々な物理シミュレーション手法や、空間探索アルゴリズム全般に応用可能である。特に、モデルの変形が頻繁に発生し、BVHの再構築がボトルネックとなるようなアプリケーションにおいては、その効果がより顕著に現れると考えられる。

5. 結論と展望

本論文では、フィードラーベクトルを基準としてメッシュデータを並び替える手法を位置ベースダイナミクスに導入した。その結果、頂点と面を両方並び替えたオブジェクトを使用することで、処理全体で約15~20%の高速化を達成した。位置ベース手法特有の計算である頂点制約計算で効果が得られたことに加え、物理シミュレーションに汎用的に適用可能な木構造を用いたBVHの更新にも効果があることが明らかになった。今後の展望として、位置ベース手法以外の物理シミュレーションへの適用や、衝突判定やレイトレーシングなど、メッシュと他オブジェクトの干渉に関するさまざまな幾何処理への応用が考えられる。一方で、本手法の課題として、効果の有無がソフトウェアの実装に依存すること、及び特に並列化処理との相性が悪いことが挙げられる。したがって、実用化の際には、処理内容に応じた適切な実装が求められる。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS科研費(JP25K15401)及びJST SPRING(JPMJSP2108)の助成を受けて実施された。

参考文献

- 1) A. Flor, M. Aanjaneya: "Spectral Reordering for Faster Elasticity Simulations", *The Visual Computer*, 40:5067–5077 (2024).
- 2) M. Müller, B. Heidelberger, M. Hennix, J. Ratcliff: "Position Based Dynamics", *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 18(2):109–118 (April 2007).
- 3) C.-H. Hong, Y. Kim, S. Yoo, C. Yoo: "Cache-Aware Virtual Machine Scheduling on Multi-Core Architecture", *IEICE Transactions on Information and Systems*, E95(D):2377–2392 (October 2012).
- 4) M. Frigo, C. E. Leiserson, H. Prokop, S. Ramachandran: "Cache-Oblivious Algorithms", *Proc. of 16th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 285–297 (February 1999).
- 5) S.-E. Yoon, P. Lindstrom, V. Pascucci, D. Manocha: "Cache-Oblivious Mesh Layouts", *ACM Trans. on Graphics*, 24(3):886–893 (July 2005).
- 6) H. Zhang, O. van Kaick, R. Dyer: "Spectral Mesh Processing", *Computer Graphics Forum*, 29(6):1865–1894 (September 2010).
- 7) C. J. Alpert, A. B. Kahng, S.-Z. Yao: "Spectral Partitioning with Multiple Eigenvectors", *Discrete Applied Mathematics*, 90(1):3–26 (1999).
- 8) H. Zhang, R. Liu: "Mesh Segmentation via Recursive and Visually Salient Spectral Cuts", *Proc. of Vision, Modeling, and Visualization 2005*, pp. 429–436 (2005).
- 9) J. A. Duersch, M. Shao, C. Yang, M. Gu: "A Robust and Efficient Implementation of LOBPCG", *SIAM Journal on Scientific Computing*, 40(5):C655–C676 (2018).
- 10) "PositionBasedDynamics", <https://github.com/InteractiveComputerGraphics/PositionBasedDynamics/>, accessed: 21 September, 2025.
- 11) S. Bouaziz, S. Martin, T. Liu, L. Kavan, M. Pauly: "Projective Dynamics: Fusing Constraint Projections for Fast Simulation", *ACM Trans. on Graphics*, 33(4):154:1–154:11 (July 2014).

(2025年3月21日受付)

(2025年7月30日再受付)

飛鳥井 翠

2025年 東京大学教養学部卒業。物理法則アニメーションに関する研究に従事。

菊池知世

2022年 東京大学大学院学際情報学府修士課程修了。現在、東京大学大学院総合文化研究科博士課程在学中。コンピュータグラフィックス、バーチャルリアリティに関する研究に従事。

金井 崇 (正会員)

1998年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。現在、東京大学大学院総合文化研究科教授。コンピュータグラフィックス、アニメーション、形状モデリングなどの研究に従事。

筆跡のゆらぎに潜む筆者個性を活用した模倣筆跡の検出

古川 諒[†] 岩下晋治[†] 常盤公徳^{††} 福江潔也[†] (正会員) 長幸平[†]

[†]東海大学情報技術センター, ^{††}警視庁科学捜査研究所

Handwriting Forgery Detection by Utilizing Writer Individuality Hidden in Within-Writer Variation

Ryoh FURUKAWA[†], Shinji IWASHITA[†], Kiminori TOKIWA^{††}, Kiyonari FUKUE[†] (Member), Kohei CHO[†],

[†]Tokai University Research and Information Center, ^{††}Forensic Sci. Lab., M.P.D

〈あらまし〉本論文は、日本における筆跡鑑定分野での模倣筆跡の検出に関するものであり、筆跡のゆらぎに存在する筆者個性を活用することにより、高い模倣検出性能が得られることを示す。本論文で使用する模倣検出法はある筆者の平均筆跡とある筆跡間のマハラノビス距離で定義される幾何学的相違度を使用することに特徴がある。このマハラノビス距離算出に使用される分散・共分散行列は、筆者内変動の空間的分布パターンを表したものであるので、得られる相違度は筆者内変動に存在している筆者個性を反映したものとなる。模倣検出実験では、67筆者が漢字5文字とカタカナ5文字からなら10文字を5回透写した透写模倣筆跡3,350標本を使用した。その結果、漢字の場合2文字、カタカナの場合4~5文字を使用すれば模倣検出率は99.9%以上となることがわかった。

キーワード：筆跡、模倣の検出、筆跡鑑定、筆者個性、筆者内変動

<Summary> This paper addresses handwriting forgery detection in handwriting analysis in Japan. We present that high performance for forgery detection can be achieved by utilizing writer individuality existed in within-writer variation. The forgery detection method used in this paper is characterized by using geometrical dissimilarity defined by Mahalanobis' distance between the mean handwriting of a writer and a handwriting sample. Because variance-covariance matrix used in calculating the Mahalanobis' distance represents spatial distribution pattern of within-writer variation, the obtained dissimilarity reflects writer individuality existed in the within-writer variation. The forgery detection experiments are performed on 3,350 traced forgery samples composed of five Kanji characters and five Katakana characters traced by 67 writers with five times. The experimental results show forgery detection rate of 99.9% or above in the case of using two characters for Kanji and four or five characters for Katakana.

Keywords: handwriting, forgery detection, handwriting analysis, writer individuality, within-writer variation

1. はじめに

本研究は、日本でなされている筆跡鑑定を応用分野として想定した筆者異同識別に関するものである。この分野の筆者異同識別は、コンピュータによる筆者認識の観点からは、テキスト依存のオフライン型筆者照合の範疇に分類される¹⁾。すなわち、同一文字について筆記後の2つの筆跡（筆者未知筆跡と筆者既知筆跡）についての筆者の異同（別人／同一人の）識別が行われる。筆跡という静的情報、特に字形という筆跡のパターン情報を対象とした筆者識別についての研究は数多くの研究が古くからなされており¹⁾⁻¹⁵⁾、実用的レベルの

筆者異同識別精度でかつ実務的にも幅広く適用可能な筆者異同識別法¹⁶⁾が提案されるようになって来ている。ただし、検討されている対象とする筆跡は、作為的に筆記されていない自然筆跡である。

一方、例えば民事訴訟では自筆の遺言書（自筆証書遺言）や何らかの契約書の署名が模倣であるかどうかが問題にされることが多々あり、パターン情報処理技術を使用した筆者異同識別についても模倣筆跡に対する耐性が高いことが要請されている。しかし、前述したような筆跡のパターン情報に基づいて筆者異同識別する識別システムは、字形が似てくる模倣筆跡に対しては本質的に脆弱ではないかと危惧される。

ところが、参考文献 16)では自然筆跡についてであるが、ある筆者が筆記した複数の筆跡の筆者内変動（“ゆらぎ”）にその筆者の筆跡個性（筆者個性とよばれる）が存在していることが指摘されており、その情報の活用により高い筆者識別性能が得られることが示されている。この筆跡の“ゆらぎ”は、人が文字を筆記する際に無意識にかつ必ず生じるものであり、模倣筆跡においても筆者の異同識別に有効な情報となり得る可能性がある。すなわち、筆跡の“ゆらぎ”に存在する筆者個性を活用した筆者異同識別法は、原理的には字形というパターン情報に基づく識別法であるにも拘わらず、筆跡の字形が似てくるはずの模倣に対して高い耐性（模倣の検出能力）を持っている可能性がある。

本論文では、“ゆらぎ”に存在する筆者個性を活用した筆者異同識別法¹⁶⁾が模倣筆跡に対してどの程度の耐性（模倣の検出能力）があるのかを明らかにする。まず本論文 2.において検討対象筆跡とする模倣筆跡の収集について説明した後、3.において模倣筆跡の検出実験で使用する筆者異同識別法の概要を示し、4.において収集した模倣筆跡の模倣品質をチェック・確認する。その上で 5.において、模倣筆跡の検出実験結果を示す。最後に 6.において、明らかとなった模倣筆跡検出の特性や性能などについてまとめる。

なお、日本における筆跡鑑定分野では主として目視観察によって筆者異同識別が実施されていることもあって、模倣筆跡についても臨書や透写といった模倣方法があることはよく知られているが、それらが原本とされた筆跡にどの程度類似しているのか、あるいはまた、模倣筆者の筆者個性がどの程度消失するのかといった模倣筆跡の基本的特性すら定量的には明らかにされていない。一方、主として署名照合分野では模倣筆跡の検出に関する研究はなされている。しかし、模倣検出性能は実験対象とした模倣筆跡の模倣品質に依存するにも拘わらず、筆跡画像は示されるが、模倣品質を定量的・客観的に評価することはなされていない。

そこで、本研究ではまず第 1 に、より現実的な模倣筆跡を実験対象とし、得られる模倣検出性能が実利用上正当に評価されうるよう、臨書筆跡や透写筆跡の収集方法（模倣してもらう筆者の種類や模倣の仕方、文字の種類）にやや複雑な工夫をした。その工夫内容は上述したように本論文の 2.に記述する。第 2 に、本研究で得られる模倣筆跡の検出性能がどのような模倣品質の模倣筆跡に対して得られたものなのかを明示し、実利用的観点からも性能を評価可能とするために、収集された模倣筆跡の模倣品質を定量的に計測した。その結果は、上述したように本論文の 4.に記述する。第 3 に、この模倣筆跡の模倣品質について報告をした 4.において、臨書や透写によって模倣筆跡が原本となった筆跡にどの程度類似してくるのか、あるいはまた、模倣筆者の筆者個性がどの程度消失してしまうのかといった模倣筆跡に関する基本的な特性を明らかにする。

すなわち、本研究では“ゆらぎ”に潜在している筆者個性

を活用することで、どの程度の模倣検出性能が得られるのかを明らかにすることに加え、上記のような模倣筆跡に関する問題の解決を図った。本論文がやや複雑な構成となっているのは、このためである。

2. 模倣筆跡の収集

2.1 注目した模倣の種類

筆跡の模倣の仕方としては、simulation と tracing が参考文献 17)では言及されているが、これらは参考文献 11)において臨書と透写とよばれているものと同じものである。simulation もしくは臨書は、模倣の原本となる筆跡（原本筆跡とよぶことにする）を筆記される紙に隣接する場所に置いて、原本筆跡を見ながら筆記する方法である。tracing もしくは透写は、原本筆跡の上に筆記される紙を重ねて透けてみえる原本筆跡をなぞり書きする方法である。本稿では、参考文献 11)に倣って臨書と透写とよぶことにし、一般に最もあり得る模倣の代表例として臨書を、また、字形が酷似する代表例として透写の 2 種類の模倣を想定した。

ここで問題となるのは、臨書である。特に模倣する動機や熱意あるいは模倣のスキルがあるとは限らない一般の被験者（模倣筆跡を筆記するボランティア）による臨書では、低い模倣品質の筆跡しか得られないのではないかという恐れがある。そこで、模倣品質が過度に低下していない臨書に匹敵する筆跡が得られることを期待して、下に置かれた原本筆跡について文字全体の形などは視認できるが、文字の詳細は見えない紙で透写してもらうことにした。実際に透写に使用してもらった紙は、坪量 64g/m²の一般コピー用紙（普通紙）である。この坪量のコピー用紙は中厚の部類に一般に分類されており、半透明の透写紙のように下にある原本筆跡の細部までを視認するのは難しいが、原本筆跡の全体の字形程度はほどほどに視認できるという状況を作り出すことができる。すなわち、ある程度の品質の臨書による模倣筆跡を得る手段として、コピー用紙を用いた透写を使用した。

一方、本来の原本筆跡に酷似する透写については、製図やデザイン分野等で使用されている半透明のトレーシングペーパー（透写紙）を用いて透写した。ただし、本研究で用いた透写紙上に筆記された筆跡を解像度 600dpi、量子化レベル数 256 階調でフラットベッド型スキャナを使用してデジタル化（入力）すると、透写紙内部などで乱反射した光のために筆跡の線が滲んでみえるということがわかった。従来の人による筆跡鑑定では、模倣筆跡の検出には筆跡の各画線にみられる渋滞や筆勢などを注視することになっており、その画線の状態（画質）に影響するという意味では好ましくない入力画像である。しかし、本研究の実験では字形というパターン情報のみが使用されるので、入力した筆跡が滲んでみえるという問題はほとんど影響しないと考えている。

2.2 実験対象データとして収集した筆跡

本実験で使用する筆跡の収集に参加した被験者は、年齢が20代～60代の男女68人である。最初に自然筆跡として架空の住所「東京都横浜市宮番町 2-3 コーポアイウエオ 405号」をコンピュータフォントで縦書きしてA4用紙にプリントアウトしたものを被験者に提示し、A4サイズの紙の記載枠の中に横書きで筆記してもらった。これを5回反復して5枚の紙に筆記された漢字・カタカナ・数字からなる文字あたり5筆跡の自然筆跡を得た（図1参照）。以後これを一般自然筆跡とよぶこととする。

次に、ある被験者（原本筆者とよぶ）のある1枚の自然筆跡（原本筆跡とよぶ）を原本として、原本筆者を除く67人の被験者（模倣筆者とよぶ）に前述のコピー用紙を使用して5回、また前述の透写紙を使用して5回それぞれ透写してもらった。これで得られた67人の被験者が各自5回ずつ筆記した2種類の模倣筆跡は、2.1で説明済みの臨書相当の筆跡が得られることを期待してのコピー用紙を使用しての透写と、原本筆跡に酷似した筆跡が得られるはずの透写紙を使用しての透写に対応した模倣筆跡である。

さらに、この模倣筆者67人中の1人は本稿の著者の中でも最も筆跡の取扱に熟達していると思われる1人（参照筆者とよぶ）であり、この参照筆者には検討対象として注目した臨書による模倣を同様に5回、時間（自然筆跡の筆記をはじめ模倣の練習を含めて合計で約3時間）をかけて慎重に実施した。これは、被験者がどの程度の模倣品質で模倣（コピー用紙と透写紙の2種類による透写）しているのかを確認するための基準とするために実施した。原本筆跡とした原本筆者の1筆跡（自然筆跡）と参照筆者の本人筆跡例（自然筆跡）を図1に示す。また、参照筆者による模倣筆跡例を図2に示す。

以上より、収集した筆跡をまとめると次のようになる。

① 被験者68人、各自5回筆記した自然筆跡

（うち1人の1筆跡が原本筆者の原本筆跡）

- ② 原本筆者を除く被験者67人の模倣筆者が各自5回コピー用紙に透写した模倣筆跡
- ③ 原本筆者を除く被験者67人の模倣筆者が各自5回透写紙に透写した模倣筆跡
- ④ 模倣筆者67人中1人を参照筆者として、参照筆者が5回臨書した模倣筆跡

3. 使用した筆者異同識別法

3.1 筆者異同識別の処理の流れと実験対象文字

本研究で使用した筆者異同識別法は、標本間ED(Euclidean distance)法¹⁶⁾、片方向MD(Mahalanobis' distance)法¹⁶⁾、双方向MD法¹⁶⁾の3種類である。標本間ED法は筆跡間ED法ともよばれ、筆跡間の字形に関する相違度を筆跡上のユークリッド距離で測定する方法であり、人が筆跡を目視したときの字形の違いとほぼ同様の結果を与える従来法として使用した。字形が似てくる模倣筆跡に対しては、その原理から検出性能が低くなるはずである。一方、片方向MD法と双方向MD法（まとめて片・双方向MD法と表記する）は、筆跡の“ゆらぎ”を反映するマハラノビス距離で筆跡間の相違度を測定する方法であり、本研究において模倣筆跡に対する検出性能を明らかにしようと注目している異同識別法である。

これら3種類の方法の違いは、筆跡間の字形の相違度の計測方法が異なるだけであり、全体の処理の流れは変わらず、(1)特徴点の発生、(2)幾何学的正規化、(3)筆跡間の相違度計測、

住所

東京都横浜市宮番町 2-3
コーポアイウエオ 405号

(a) 参照筆者のコピー用紙による透写筆跡

住所

東京都横浜市宮番町 2-3
コーポアイウエオ 405号

(a) 原本筆者の自然筆跡（原本筆跡）

住所

東京都横浜市宮番町 2-3
コーポアイウエオ 405号

(b) 参照筆者の自然筆跡

図1 本人筆跡の例（自然筆跡）

Fig.1 Genuine handwriting samples (natural handwriting)

東京都横浜市宮番町 2-3

コーポアイウエオ 405号

(b) 参照筆者の透写紙による透写筆跡

住所

東京都横浜市宮番町 2-3
コーポアイウエオ 405号

(c) 参照筆者の臨書筆跡

図2 参照筆者の模倣筆跡例

Fig.2 Forged handwriting examples by the reference writer

(4)筆者異同識別となる。その詳細は参考文献 16)に示されているので、ここでは後続の 4 や 5 で記述する実験内容の理解や結果の解釈に問題が生じない程度に、この処理に沿って順次その概要を下記 3.2~3.5 に示す。

なお、後述する異同識別実験において、収集した文字「東京都横浜市宮番町 2-3 コーポアイウエオ 405 号」中、漢字列の中程にある「都横浜市宮」5 文字と文末より少し前にある「アイウエオ」5 文字の計 10 文字を処理対象文字とした。これは、被験者に連続筆記してもらった文字列の書き出し部分では書き慣れていないことや書き終わる部分では早く書き終わらせたいという被験者の気持ちが模倣品質に何らかの影響を与えることを念のために避けたためである。また、字画構成が複雑な漢字と逆に簡素なカタカナに応じて、模倣の難易度が変わる可能性があるであろうと考えて 2 種類の文字種を選択した。文字数はそれぞれ 5 文字程度あれば、通常の自然筆跡に対する筆者異同識別性能に関する文字数依存性の評価に十分であることを考慮したためである。

3.2 特徴点の発生

最初に、字形という特徴を捉えるための特徴点とよぶ点を筆跡の各字画上に発生させる。本研究では有効点探索法¹⁸⁾で発生させた図 3 に示す特徴点を使用した。有効点探索法は、字画を N 等分する仮の特徴点を発生させた後、その中から筆者異同識別に有効な仮特徴点のみを特徴点として採用する方法である。

図 3 は、黒色で描画した標準パターン（後述する）上に発生させた特徴点を黄色で描画したものである。発生させた特徴点数は、漢字「都、横、浜、市、宮」についてそれぞれ 38 点、27 点、23 点、14 点、35 点、カタカナ「ア、イ、ウ、エ、オ」についてそれぞれ 45 点、76 点、38 点、52 点、38 点である。なお、図中で特徴点が高密度に配置されている部位では、黄色の●印に付けてある黒色の枠も高密度に描画されているために、黄色が薄黒く表示されて特徴点の黄色が視認しづらくなっていることに注意されたい。例えば、「イ」や「エ」の第 2 画の中央部などが特に視認しづらくなっている。

さらに、図 3 には各字画から波紋のような濃淡の波が拡がっているようにみえるが、字画に近い側の波紋が筆者内変動に対応しており、多数の筆者内筆跡対の内 90% の筆跡対がその波紋内に存在していることを表している。同様に、各字画から離れた側に拡がっている波紋は、筆者間変動に対応しており、多数の筆者間筆跡対の内 90% の筆跡対がその波紋内に存在していることを表している。理想的には筆者個性を表す筆者間変動が大きく、個々の筆者の書きムラ（ゆらぎ）を表す筆者内変動が小さい（安定している）部位に特徴点が配置されることが望ましいと考えられる。図 3 に示す特徴点はこの 2 つの筆者内変動分布と筆者間変動分布を考慮して、筆者異同識別精度が高くなる特徴点として選定されたものである。



図 3 標準パターン上に発生させた特徴点

Fig.3 Feature points generated on standard patterns

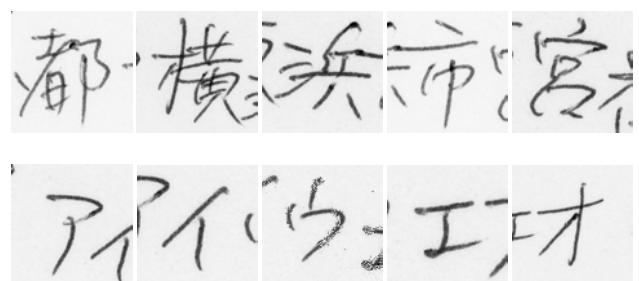


図 4 幾何学的正規化例（原本筆跡）

Fig.4 Geometric normalization samples (original handwriting)

3.3 幾何学的正規化

一般に筆跡の大きさは様々であるが、2 つの筆跡間の字形の違い（相違度）を計測する前に、計測対象の筆跡の大きさを一定に揃えておく必要がある。この処理を幾何学的正規化とよび、文字ごとに標準とする大きさの文字パターン（標準パターンとよぶ）を設けて、検査対象のすべての筆跡の特徴点群を標準パターンの特徴点群に合わせ込む幾何変換を施す。幾何変換としては等方向の拡大・縮小、回転、平行移動を許

容するヘルマート変換¹⁰⁾を使用するので、字形は変換前後で不变である。標準パターンとしては、図3に黒色で示したコンピュータフォントを使用した。幾何学的正規化を施した原本筆跡例を図4に示す。

3.4 筆跡間の相違度計測

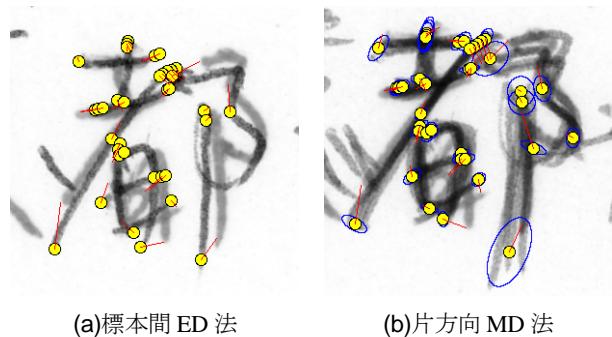
標本間ED法では、まず注目する2つの筆跡のうち一方の筆跡の特徴点群に他方の筆跡の特徴点群ができるだけ重なるように（マッチングするように）幾何学的正規化時と同様にヘルマート変換したときの幾何変換残差、すなわち、対応する特徴点間のユークリッド距離を各特徴点について求める。次にその筆跡対について求められた特徴点群のマッチング残差のRMS（Root Mean Square）値を注目する2つの筆跡間の相違度とする。

図5(a)は原本筆跡と参照筆者の1筆跡に注目した場合の例であり、注目する2つの筆跡を重ね表示し、原本筆跡の特徴点を黄色の●印で、計測される特徴点間のユークリッド距離を赤色の線分で示してある。全特徴点についての赤色の線分の長さ（マッチング残差）のRMS値がこの筆跡対の相違度として算出される。この相違度は、2つの筆跡を目視したときの字形の違いを表していると考えられる。

片方向MD法では、注目する筆者の平均筆跡と注目する筆跡間で字形の相違度を考える。ここで平均筆跡は、ある1文字について1筆者あたり複数の筆跡がある場合、筆跡上に配置されている各特徴点について、複数からなる各特徴点の平均特徴点を考えることができ、この平均特徴点群で表される仮想的な筆跡を指す。各筆跡の各特徴点は、平均特徴点の周囲に分布しており、その2次元画像平面上の分散・共分散行列はその特徴点まわりの筆跡の“ゆらぎ”を表している。

そこで、この分散・共分散行列で平均特徴点と注目する筆跡の対応する特徴点までのユークリッド距離を正規化したマハラノビス距離をまず求める。ここでユークリッド距離は、標本間ED法の場合と同様に、注目する筆跡の特徴点群を注目する筆者の平均筆跡の平均特徴点群にできるだけ合わせ込むようにヘルマート変換したときの幾何変換残差（マッチング残差）として求めたものである。次に、その筆跡対について求められた特徴点群のマハラノビス距離のRMS値を、注目する2つの筆跡間の相違度（マッチング残差）とする。

図5(b)は、片方向MD法での相違度計測の様子を図示した例であり、原本筆者の5筆跡と参照筆者の1筆跡の計6筆跡を重ね表示し、黄色の●印が原本筆者の平均特徴点を、青色の楕円が各平均特徴点まわりの“ゆらぎ”を表すマハラノビス距離 3σ の等距離線である。ここで、マハラノビス距離は、本来なら無単位であるが、1次元の“ゆらぎ”では“ゆらぎ”的標準偏差 σ の何倍の距離であるのかを意味していることから、物理的意味がわかりやすいように σ の倍数で表記した。なお、 3σ は特徴点の“ゆらぎ”として正規分布を仮定したとき、“ゆらぎ”的99.7%が楕円内に分布していることを意味す



(a)標本間 ED 法 (b)片方向 MD 法

図5 筆跡間の相違度計測

る。図中の赤色の線分は、平均特徴点と対応する参照筆者の1筆跡中の特徴点までのユークリッド距離を示したものである。

片方向MD法では、マハラノビス距離（平均筆跡 m のある平均特徴点から注目する筆跡標本 s の対応する特徴点までの距離であるので $R_{m \rightarrow s}$ と表記する）を計測する始点側の筆跡は複数あるが、終点側の筆跡は1つという状況を想定した。これに対して、双方向MD法では、終点側の筆跡についても同一筆者の筆跡が複数存在するという状況を想定する。この場合、終点側の特徴点についても複数の特徴点の分散・共分散行列を求めることができる。そこで、その分散・共分散行列を使用して終点側の特徴点から平均特徴点までの逆方向のマハラノビス距離 $R_{m \leftarrow s}$ を求める。このとき使用する分散・共分散行列は、終点側の複数筆跡の平均特徴点まわりのものであり、今注目している筆跡標本の特徴点まわりのものではないので、数学的に定義されるマハラノビス距離とは厳密には異なる。しかし、その注目する特徴点付近の“ゆらぎ”を表しており、物理的には計測される逆方向のマハラノビス距離 $R_{m \leftarrow s}$ は、その筆者のその特徴点付近の“ゆらぎ”に存在する筆者個性を反映したものとなる。

次に、平均特徴点を起点とするマハラノビス距離 $R_{m \rightarrow s}$ を片方向MD法と同様に求めておき、その逆方向のマハラノビス距離 $R_{m \leftarrow s}$ との平均を注目する平均特徴点と注目する特徴点とのマッチング残差とする。最後に、特徴点群のマッチング残差のRMS値を注目する2つの筆跡間の相違度とする。

なお、複数の文字についての相違度は、各文字について求められた相違度の算術平均で定義する。これは標本間ED法や片・双方向MD法の場合でも同様である。

3.5 異同識別

数多くの筆跡対について計測された相違度の出現頻度を求めるとき、一般に図6に示すような2つの分布が得られる。相違度が小さい原点側の分布は、同一筆者による複数の筆跡対のもので筆者内変動分布とよばれる。逆に相違度の大きい側の分布は、異なる筆者の筆跡対のもので筆者間変動分布とよばれる。筆者異同識別では、ある識別境界 T より小さい相

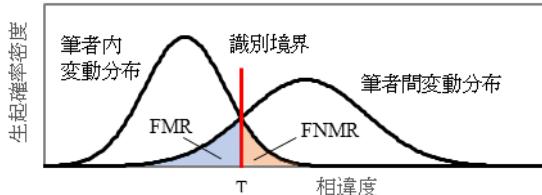


図 6 識別境界と識別誤差

Fig.6 Decision boundary and verification error

違度を示す筆跡対は同一人によって筆記されたものと判定し, T より大きい相違度を示す筆跡対は別人によって筆記されたものと判定する。本研究では識別境界 T は, KS 法¹⁶⁾ (KS 識別法) により基本的には筆者内変動分布と筆者間変動分布が交差する箇所に置かれる。

図 6において, FNMR (false non-match rate) は同一人が筆記したにも拘わらず別人のものであると誤識別される割合を表し, FMR (false match rate) は別人により筆記されたにも拘わらず同一人によるものと誤識別される割合を表す。それらの平均を平均識別誤差, 1 から平均識別誤差を引いたものを平均識別精度とよぶ。本研究では, 原本筆者とは異なる別人が筆記した模倣筆跡が正しく別人によるものであると検出できるのかが問題となる。そこで, 1 から FMR を差し引いた値として定義される TNMR (true non-match rate) を模倣検出率とよぶことにする。ただし, 識別対象が自然筆跡の場合は, TNMR を別人正答率とよぶことにする。

4. 模倣品質の確認

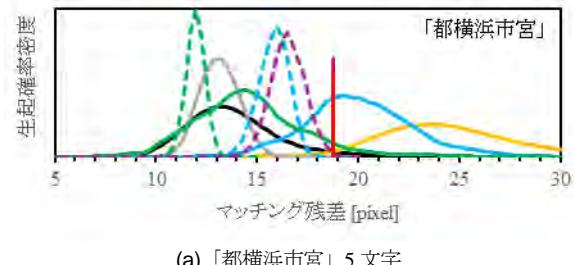
4.1 被験者 67 人の模倣筆跡について

(1) 品質確認の内容

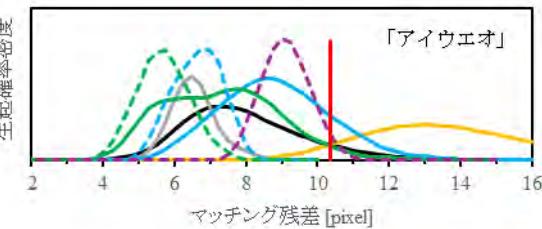
模倣筆跡の検出実験の前に, 収集した模倣筆跡の模倣品質を確認しておく。確認にあたっては, 筆跡画像上の字形の違い (ユークリッド距離) をそのまま表した標本間 ED 法を使用し, 模倣の原本とされた原本筆跡との相違度を計測した。また, 2.で説明済みの各種収集筆跡の筆者内変動や筆者間変動を計測した。「都横浜市宮」の漢字 5 文字と「アイウエオ」のカタカナ 5 文字についての計測結果 (各文字についての相違度の文字平均) を図 7 に示す。また, 計測された各種相違度分布の平均と標準偏差及び後述の識別境界を表 1 に示す。

(2) 一般自然筆跡について

図 7において黒色と橙色の実線は, 68 人の被験者全員の自然筆跡 (一般自然筆跡) についての筆者内変動分布と筆者間変動分布 (以後, まとめて筆者内・間変動分布と表記する) をそれぞれ表している。この一般自然筆跡の筆者内・間変動分布から得られる筆者異同識別の識別境界を参考のために赤色の実線で示してある。表 1 の分布の平均をみると, 字画構成が単純なカタカナは, 筆者内・間変動とも漢字の 50~60% の相違度を示しており, それに応じて識別境界もカタカナは



(a) 「都横浜市宮」 5 文字



(b) 「アイウエオ」 5 文字

図 7 ユークリッド距離で計測された原本筆跡との相違度分布

Fig.7 Distributions of dissimilarity measured by Euclidean distance between the original and forgeries

表 1 ユークリッド距離で計測された原本筆跡との相違度の平均と標準偏差

Table 1 Mean and standard deviation of dissimilarity measured by Euclidean distance between the original and forgeries

[pixel]

	「都横浜市宮」		「アイウエオ」	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
一般筆者内変動 (自然筆跡)	13.9	2.23	8.2	1.87
一般筆者間変動 (自然筆跡)	24.5	3.12	13.9	2.57
原本筆者内変動 (自然筆跡)	13.3	0.95	6.7	0.65
原本1筆跡-模倣筆跡間相違度 (コピー用紙)	20.2	2.57	9.0	1.60
原本1筆跡-模倣筆跡間相違度 (透写紙)	14.7	2.62	7.5	1.65
原本1筆跡-参考筆者間相違度 (コピー用紙)	15.9	0.74	6.8	0.69
原本1筆跡-参考筆者間相違度 (透写紙)	12.1	0.47	5.8	0.75
原本1筆跡-参考筆者間相違度 (臨書)	16.6	0.84	9.2	0.67
識別境界 (一般自然筆跡)	18.7		10.4	

漢字の 56% と小さくなっている。

図 7 における灰色の実線は、原本筆者の筆者内変動分布である。原本筆者と一般自然筆跡の筆者内変動分布を図 7 や表 1 で見比べると、原本筆者は漢字については 68 人の被験者の中では平均的な変動（ゆらぎ、書きムラ）で筆記しているが、カタカナについては小さな変動で筆記していることがわかる。

(3) 模倣筆跡（コピー用紙に透写）について

原本筆者を除く 67 人の被験者（模倣筆者）による模倣筆跡と原本 1 筆跡との相違度分布については、図 7 において青色と緑色の実線がそれぞれコピー用紙に透写した透写筆跡と透写紙に透写した透写筆跡の相違度分布を表している。もし複写機を使用して原本筆跡を複写した場合、原理的にはその複写筆跡と原本筆跡との間の相違度は 0 pixel となることから、模倣筆跡は橙色で示されている一般自然筆跡の筆者間変動分布より左側で、かつ理想的模倣がなされるほど 0 pixel に近い位置（相違度）に分布するはずである。

ところが青色で示されたコピー用紙による透写筆跡は、予想されたように一般自然筆跡の筆者間変動分布より図 7 のグラフの横軸左側に位置してはいるが、一般自然筆跡の筆者内変動分布との間に分布している。すなわち、原本筆跡に近づいて（類似して）はいるが、原本筆者の筆者内変動の平均値を 1 とすると漢字の場合 1.6 倍程度、カタカナの場合 1.5 倍程度の大きさで相違している。また、一般自然筆跡の筆者内・間変動分布の平均値の差を模倣筆者の筆者個性とすると、筆者個性は漢字の場合 30% 程度、カタカナの場合 70% 程度の消失にとどまっており識別境界に重なるように分布している。言い換えると、コピー用紙による透写筆跡には、一般自然筆跡の筆者間変動分布が示す筆者個性が相当量残存しており、部分的には別人が筆記したものとして模倣を検出可能な程度の低い模倣品質となっている。なお、カタカナは漢字よりもより左側へシフトする割合が大きいことから、模倣し易かつたことがわかる。

(4) 模倣筆跡（透写紙に透写）について

一方、緑色で示されている透写紙による透写筆跡は、原本筆跡に酷似してくることから（図 2 参照）、その原本筆跡との相違度は 0 pixel 付近になるであろうとの予想に反して、0 pixel 付近ではなく漢字の場合 10 pixel 以上、カタカナの場合 4 pixel 以上的一般自然筆跡の筆者内変動付近に分布している。これは、透写紙によるなぞり書きをしても書字行動が伴うかぎり、複写機のようには模倣できず、一般自然筆跡の筆者内変動程度のゆらぎが存在していることを意味している。原本筆跡との相違度が一般自然筆跡の筆者内変動程度であるので、目視では原本筆者とは別人が筆記したものと判断するのは困難である。原本筆跡との類似（相違）の程度をみると、原本筆者の筆者内変動の平均値を 1 とすると漢字の場合 1.3 倍程度、カタカナの場合 1.4 倍程度の大きさで相違している。また、一般自然筆跡の筆者内・間変動分布の平均値の差を模倣

筆者の筆者個性とすると、筆者個性は漢字の場合 70% 程度、カタカナの場合 80% 程度消失しており識別境界より右側にはわずかしか分布していない。

言い換えると、透写紙になぞり書きした透写筆跡すら一般自然筆跡の筆者内変動程度の“ゆらぎ”が存在することから、もし 0 pixel 付近といった相違度しか観測されなかった場合、その筆跡は人による書字行動で作成されたものではなく複写機のような機械による複写だとか筆跡画像のコピー&ペーストのような電子的操作で作成されたことを疑うべきであることを示唆している。

なお、緑色で示された透写紙による透写筆跡の原本筆跡との相違度分布の大部分は、識別境界より左側の相違度の小さい側に分布していることから、標本間 ED 法で相違度を計測する限り、その検出はほとんど不可能であることもわかる。

4.2 参照筆者の模倣筆跡について

(1) 参照筆者の筆跡についての品質確認内容

原本筆跡と参照筆者の模倣筆跡間の相違度分布については、図 7 において青色と緑色の点線がそれぞれコピー用紙と透写紙に透写した透写筆跡を表しており、紫色の点線が臨書筆跡の原本筆跡との相違度分布を表している。いずれも点線で示してある。

(2) 透写筆跡について

コピー用紙と透写紙に透写した透写筆跡については、青色・緑色の実線で示されている模倣筆者の分布それぞれの左端近くに参照筆者の模倣筆跡が位置しており、参照筆者を含む 67 人の被験者中、トップクラスの模倣品質で透写されていることがわかる。ただし、トップではないことは確認している。すなわち、参照筆者を除く 66 人の被験者の中には、高い品質で透写できる筆者がわずかではあるが存在していることを意味している。

なお、緑色の点線で示されている参照筆者の透写紙による透写筆跡は、黒色の実線で示されている一般自然筆跡の筆者内変動や灰色の実線で示されている原本筆者内変動よりも左側に位置している。すなわち、参照筆者の透写紙による透写筆跡の筆者内変動が自然筆跡のそれよりも小さくなっている。一般の自然筆跡ではこのような小さな書きムラで筆記されることではなく、不自然であり異常な状態となっている。これは 1 つの原本筆跡を複数回なぞり書きしたことに起因した現象と考えられる。逆にいえば、ある筆者不明の複数の筆跡についての変動が、一般にみられる筆者内変動よりも小さいという不自然な状態が観測された場合、その筆者不明筆跡は模倣筆跡である可能性があることを意味している。

(3) 臨書筆跡について

紫色の点線で示してある参照筆者の臨書筆跡についてであるが、参照筆者自身のコピー用紙による透写筆跡より右側の相違度が大きくなる側に位置している。すなわち、筆跡に

関して経験の深い参考筆者が慎重に模倣したにも拘わらず、その臨書の模倣品質は参考筆者自身のコピー用紙による透写筆跡に及ばないということを意味している。このことから、もし筆跡について特にスキルのない一般の被験者が臨書したとすると、その臨書筆跡の模倣品質は参考筆者の臨書筆跡附近からその右側に分布するであろうと推定される。すなわち、一般の被験者によるコピー用紙による透写筆跡は、一般筆者による臨書を概ね近似する模倣品質の筆跡であると考えられる。これは模倣筆跡の収集当初のねらいを概ね満足している（特に漢字の場合）。カタカナについては、漢字のように字画が直線状ではなく曲線状になっていることが多いためか、参考筆者の臨書筆跡はコピー用紙による透写筆跡の平均付近に位置しており、意外なことに参考筆者にとっては高品質に模倣するのは臨書ではかなり難しかったことがわかる。

5. 模倣筆跡の検出結果

5.1 相違度の計測結果

(1) 相違度の計測

前章4.では模倣品質を調べるために、模倣の原本となった1筆跡すなわち原本筆跡と模倣筆跡との間の相違度に注目した。しかし、一般的な筆跡鑑定では、模倣した場合の原本筆跡が与えられることはなく、筆者既知筆跡（文字あたり複数の筆跡が存在する）と筆者未知筆跡（文字あたり1筆跡しか存在しない場合もある）が検査対象筆跡として与えられ、その間の相違度が計測される。したがって本章5.では、筆者既知筆跡として与えられる原本筆者の複数の自然筆跡と筆者未知筆跡として与えられる模倣筆跡との間の相違度を計測した。

ユークリッド距離あるいはマハラノビス距離、すなわち標本間ED法と片・双方向MD法で計測した漢字・カタカナそれぞれ5文字平均の相違度分布を図8と図9に示す。図中、コピー用紙と透写紙による透写筆跡は、それぞれ青色と緑色で示してある。また、参考のために、原本筆者の自然筆跡の筆者内変動分布を灰色で、一般自然筆跡の筆者内・間変動分布をそれぞれ黒色と橙色で、さらに一般自然筆跡から決定される識別境界を赤色で示してある。

(2) 標本間ED法による計測結果

標本間ED法（図8）では、青と緑で示されている模倣筆跡の相違度分布が図7に示した原本筆跡との相違度分布と比べて横軸の右側の相違度が大きい側へシフトしているのがわかる。これは、原本筆者の筆者内変動分布が図8には付加されているためである。模倣筆跡の相違度分布がグラフの横軸右側へシフトして識別境界（赤色）を越える模倣筆跡の割合が多くなっていることから、臨書レベルの模倣品質を想定したコピー用紙による模倣筆跡（青色）であれば、模倣筆跡を標本間ED法でかなり正しく模倣検出できそうなことがわかる（特に漢字の場合）。また、透写紙による模倣筆跡（緑色）でも識別境界（赤色）を越えた右側にも少しあは分布しているこ

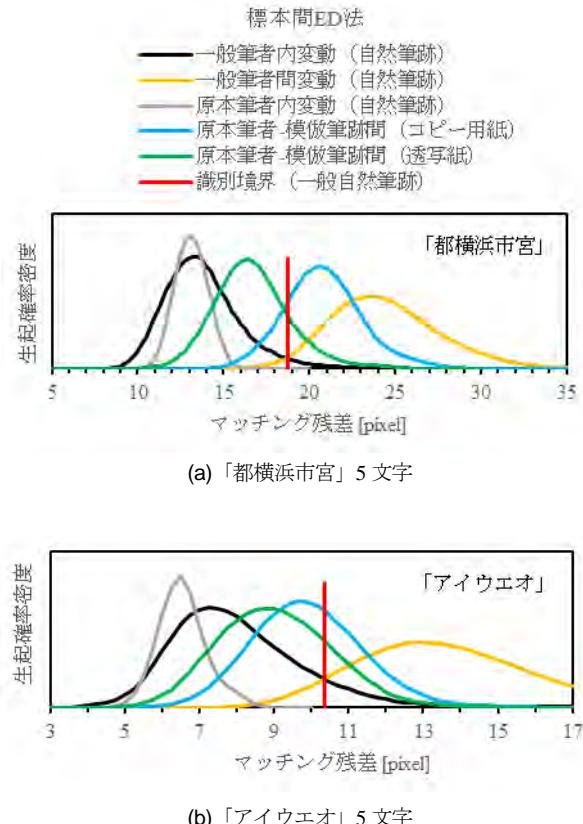


図8 ユークリッド距離で計測された原本筆者5筆跡との相違度分布

Fig.8 Distributions of dissimilarity measured by Euclidean distance

between five genuine handwritings of the original writer and forgeries

とから、ある程度は模倣筆跡であると検出可能なことがわかる。

(3) 片・双方向MD法による計測結果

図9では、実線と点線がそれぞれ片方向MD法と双方向MD法の場合を表している。片・双方向MD法では、原本筆者内変動（字形の「ゆらぎ」）に存在している筆者個性を反映した相違度が計測されるために、原本筆者とは異なる別人が筆記した模倣筆跡と原本筆者の5筆跡との間の相違度は大きくなる。その結果、模倣筆跡の相違度分布は、原本筆者を含む被験者68人の一般自然筆跡の筆者内変動分布よりグラフ上右側の相違度が大きくなる側に離れた位置に分布している。一般自然筆跡の筆者間変動分布も、同様に筆者内変動分布から右側へ大きく離れて分布するために、識別境界が相対的に筆者内変動分布側近くに設定されている。これらの模倣筆跡の相違度分布がグラフ横軸の右側へ、識別境界がグラフ横軸の左側へシフトするという2つの現象が相まって、透写紙による模倣筆跡ですら、その大部分は識別境界の右側に分布していることから、模倣筆跡の筆者は別人であるとほとんど正しく検出できそうであることがわかる。

なお、自然筆跡に対しては一般に双方向MD法の方が片方向MD法より相違度が大きくなるのが一般的である。しかし、

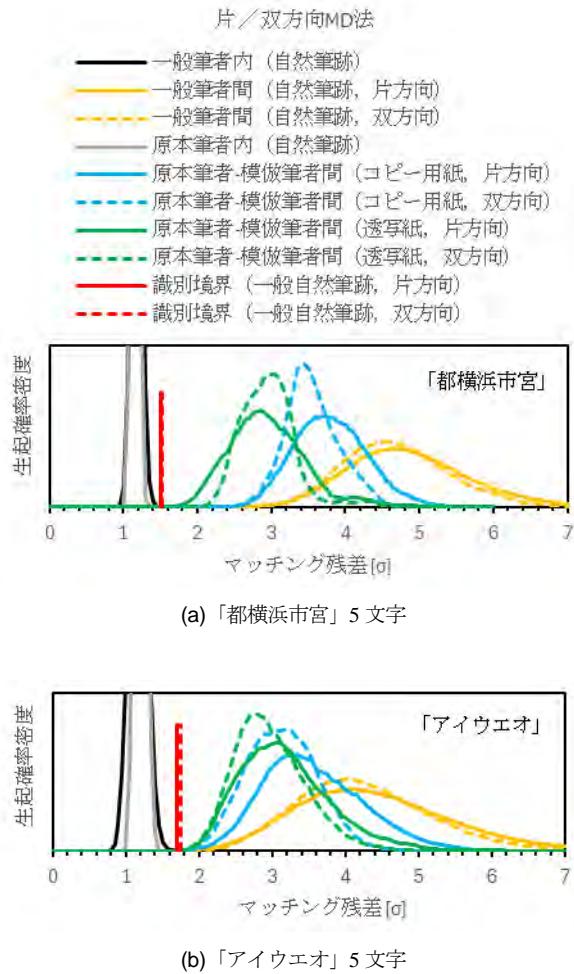


図9 マハラノビス距離で計測された原本筆者5筆跡との相違度分布
Fig.9 Distributions of dissimilarity measured by Mahalanobis' distance between five genuine handwritings of the original writer and forgeries

模倣筆跡に対しては特に図9(b)のカタカナにおいて、双方向MD法の相違度分布が片方向MD法の相違度分布より、やや左側の相違度が小さくなる側に位置している。これは、図8(b)に示されているように原本筆者内変動（灰色の分布）が一般自然筆跡の筆者内変動（黒色の分布）より小さい一方で、模倣という作為的筆記がなされている模倣筆跡ではその模倣筆者側のゆらぎ（模倣筆者の筆者内変動）が大きいために、模倣筆跡から原本筆者の平均筆跡までのマハラノビス距離が小さくなり、結果として双方向のマハラノビス距離の5文字平均も小さくなつたためである。この影響で双方向MD法が片方向MD法より高い模倣検出率を必ずしも示さないであろうことが予想される。

5.2 模倣検出率

(1) 模倣検出の実験内容と結果の提示方法

実験対象とした文字数は漢字とカタカナそれぞれ5文字あり、漢字とカタカナごとに2分したとしても5文字中1文字を識別に使用するのはそれぞれ5ケースある。同様に5文字

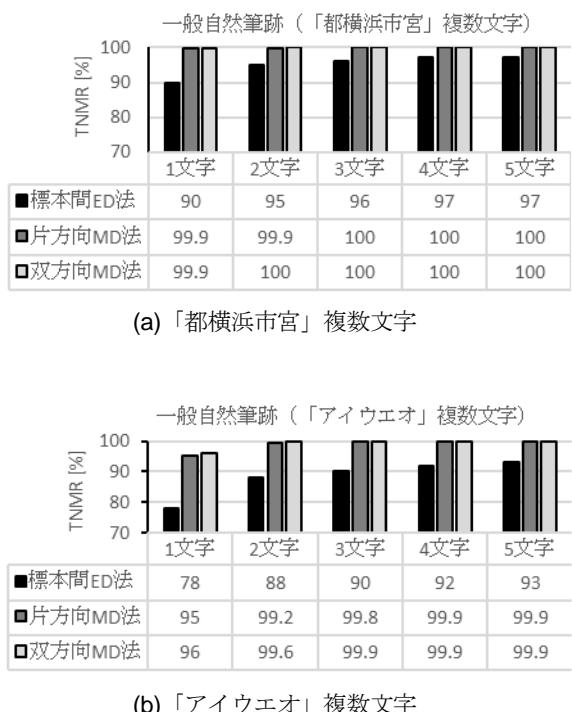


図10 一般自然筆跡のTNMR (複数文字)
Fig.10 TNMR for natural handwriting (character combinations)

中2文字及び3文字を使用するのはそれぞれ10ケース、4文字を使用するのは5ケース、5文字を使用する場合のみ1ケースであり、合計で31ケースとなる。これらすべてのケースについて、TNMR（模倣検出率）を本実験では求めたが、煩雑さを避けて全体の傾向が把握しやすいように、ここでは識別に使用した5文字のケース以外の1文字～4文字のケースでは得られたTNMRの平均を示すこととする。なお、ここで示すTNMRの数値は、できるだけ読みやすいように99%未満の場合は小数点以下1桁目を四捨五入し、99%以上100%未満の場合は小数点以下2桁目を切り捨てにした。

相違度の計測方法としては、標本間ED法、片方向MD法、双方向MD法の3種類を適用したが、片・双方向MD法が本研究で注目する計測方法であり、標本間ED法はそれと比較する従来法としての意味を持つ。すべての識別実験では、被験者68人の一般自然筆跡の筆者内・間変動分布からKS識別法により平均識別精度が最小になるように定められる識別境界を使用した。一般自然筆跡に対しては、TNMRは筆者間の筆跡対が正しく別人の筆跡であると識別される割合を意味するので、ここでは別人正答率とよぶが、それを図10に示す。なお、KS識別法を使用した場合、別人正答率と平均識別精度とはほとんど同じ値となる。

(2) 一般自然筆跡の別人正答率

図10において漢字の場合、標本間ED法では1文字平均ではTNMRは90%であり5文字すべてを識別に使用しても97%であるのに対して、片・双方向MD法では1文字平均で99.9%

となっている。カタカナの場合、標本間 ED 法では 1 文字平均では 78% であり 5 文字すべてを識別に使用しても 93% であるのに対して、片・双方向 MD 法では 99.9% 以上となるのはそれぞれ 4 文字と 3 文字である。これらの別人正答率は参考文献 16)で報告されている平均識別精度と比べてやや高いとなっている。参考文献 16)の筆跡は、記入場所を指定する枠線などがない 10cm 四方の大きさの白紙 1 枚の中央付近に 1 文字のみ筆記されたもので、複数文字についてはそれぞれ別の白紙に記入されている。これに対し、本実験で収集した筆跡は、図 1 や図 2 に示したように枠付きの記入用紙に複数の文字を一連の文字列として連続して筆記してもらったことが影響している可能性がある。

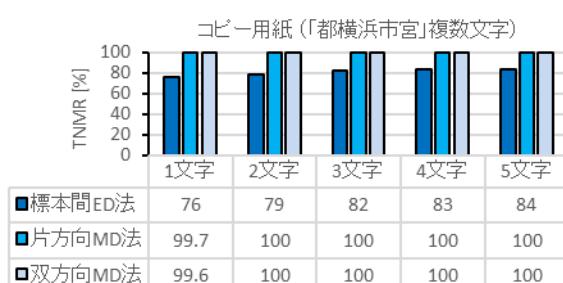
(3) 模倣検出率 (標本間 ED 法使用時)

コピー用紙と透写紙による透写筆跡の模倣検出率は、それぞれ図 11 と図 12 に示すようになった。標本間 ED 法では、コピー用紙による透写筆跡であれば、漢字の場合 1 文字で 76%, 5 文字で 84% の模倣検出率が得られている。これは細部にわたっての模倣が難しいコピー用紙による透写の場合、画数の多い漢字では模倣品質が低下している (模倣がうまくできていない) ことを反映した結果であり、標本間 ED 法であっても自然筆跡に対する別人正答率より 15% 程度の低下で模倣を検出できている。しかし、筆者内変動分布が拡がって筆者間変動分布との分離度が低下して (図 8(b)), 別人正答率が低下する (図 10(b)) カタカナでは、コピー用紙による透写

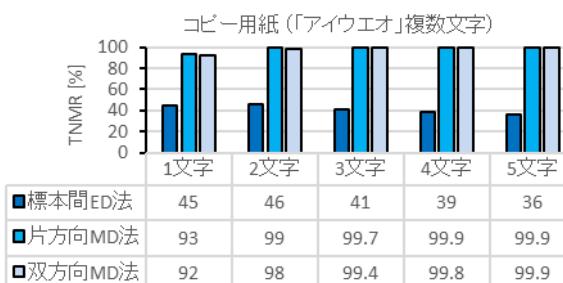
筆跡であっても、1 文字のときが最高の 45% の模倣検出率となっている (図 11(b))。さらに、透写紙による透写筆跡では漢字とカタカナの両ケースで最高が 1 文字のときの 35% と模倣検出率は激減している (図 12(b))。

なお、自然筆跡の場合、識別に使用する文字数を増加させると図 10 に示したように TNMR (別人正答率) や平均識別精度は一般的に高くなる。しかし、標本間 ED 法で相違度を計測すると、コピー用紙によるカタカナの透写筆跡 (図 11(b)) や特に透写紙による透写筆跡 (図 12) では、識別に使用する文字数を増加させると TNMR (模倣検出率) が明確に低下している。すなわち、標本間 ED 法では、筆者異同識別精度の向上を期待して識別に使用する検査対象文字数を増加させればさせるほど、模倣筆跡の検出率は低下してしまうという興味ある現象を確認できる。これは、複数文字について各 1 文字の相違度の算術平均を求めるとき (図 8 や図 9 などに示した相違度分布が平均値付近により集中して (分散が小さい) より尖った釣鐘状の分布になり (参考文献 16) の図 7 を参照)、複数文字についての相違度の平均値が識別境界より小さい (識別境界の左側) か/大きい (識別境界の右側) かによって、識別精度の低下/向上に逆に働くためである。 その理由を以下に補足説明する。

例えば、図 8(b) のカタカナ 5 文字について青色で示された “原本筆者 - 模倣筆者間変動 (コピー用紙)” は、各 5 文字についての相違度を算術平均した結果である。元の各 1 文字の



(a) 「都横浜市宮」複数文字



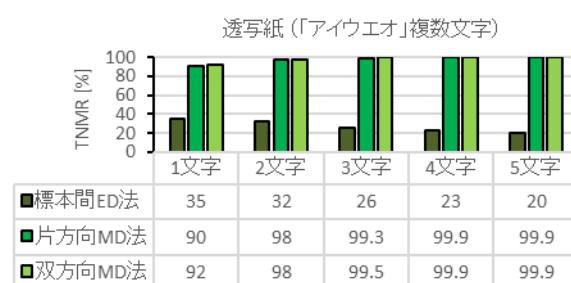
(b) 「アイウエオ」複数文字

図 11 コピー用紙による模倣筆跡の TNMR (複数文字)

Fig.11 TNMR for tracing forgery by copy paper (character combinations)



(a) 「都横浜市宮」複数文字



(b) 「アイウエオ」複数文字

図 12 透写紙による模倣筆跡の TNMR (複数文字)

Fig.12 TNMR for tracing forgery by tracing paper (character combinations)

5つの相違度分布は、各文字の特性を反映し、それぞれ異なる分布形状で異なる位置に分布している。すなわち、各文字それぞれの平均値や最小値・最大値は、文字ごとに異なっている。ここで、5つの各相違度分布の平均値と最小値・最大値が算術平均によってどのように変化するのかを考えてみよう。

5つの各相違度分布の平均値の算術平均値は、当然のことながら5文字についての相違度分布の平均値に一致する。図8に示してある5文字についての相違度分布のピーク付近がその算術平均の結果に対応していることになる。5つの各相違度分布の5つの最小値を算術平均すると、5つの最小値の平均となるが、その値は5つの最小値中の最小値より必ず大きくなる。相違度分布図でいえば、5文字分の相違度分布の平均値側（グラフでは右側）へ移動することになる。5つの各相違度分布の5つの最大値について算術平均すると、5つの最大値中の最大値より必ず小さくなり、最小値の場合とは逆に必ず5文字分の相違度分布の平均値側（グラフでは左側）へ移動することになる。最小値・最大値以外の例ええば1/4位数や1/2位数（中央値）また3/4位数などについても同様に5文字の相違度分布の平均値に近づく。したがって、複数文字についての相違度の算術平均を求めるとき、その平均値（分布のピーク付近）に集中したより尖った釣鐘状の分布となる。

次に、この相違度分布の形状変化が識別精度に与える影響をみてみよう。例えば図8(b)のカタカナ5文字について青色で示された“原本筆者一模倣筆者間変動（コピー用紙）”のピーク（平均値付近にある）は、図中に赤色で示されている識別境界より小さい側（左側）に位置している。すなわち、相違度分布のピークより右側に識別境界は位置しているので、各1文字の相違度分布が右側の識別境界よりさらに右側に拡がって分布していたとしても、5文字の相違度分布では算術平均により識別境界より左側（ピーク側）に分布する割合

（FMR）は増加し、識別境界の右側に分布する割合（TNMR）が減少することになる。図11(b)によれば、識別境界より右側に分布する割合（TNMR）は、各1文字のとき平均で45%であったものが5文字の場合36%に減少していることがわかる。これに対して、図8(a)の漢字5文字について同じく青色で示された“原本筆者一模倣筆者間変動（コピー用紙）”の場合、5文字の相違度分布のピーク（平均値付近にある）は赤色で示された識別境界より右側に位置していることから、5文字の相違度分布ではピークの左側に位置する識別境界よりさらに左側に分布する割合（FMR）は減少し、識別境界の右側に分布する割合（TNMR）が増加することになる。同様に図11(b)によれば、識別境界より右側に分布する割合（TNMR）は、各1文字のとき平均で76%であったものが5文字の場合84%に増加していることがわかる。さらに、図8に緑色で示されている“原本筆者一模倣筆者間（透写紙）”のピークは、漢字・カタカナの両ケースとも識別境界より左側に位置しているので、5文字の算術平均により、識別境界より右側に分布する

割合（TNMR）は必ず減少することになる。

このように、相違度分布の平均値（分布のピーク付近）が識別境界より小さいのか（グラフでは左側にあるのか）、あるいは大きいのか（グラフでは右側にあるのか）によって、TNMRに与える影響は逆になる。自然筆跡のように注目する筆者間変動分布の平均値が識別境界より大きければ使用する文字数の増加とともにTNMRは向上するが、原本筆者の筆跡に類似してくる透写筆跡を標本間ED法で相違度を計測した場合、その平均値が識別境界より小さければ使用する文字数の増加とともにTNMRは減少する。自然筆跡の場合、筆者間変動分布の平均より大きい位置に識別境界が設定されることは識別原理上あり得ないので、使用する文字数の増加とともにTNMRが減少するという現象は、従来の標本間ED法を使用した場合の模倣筆跡特有の現象であると考えられる。

(4) 模倣検出率（片・双方向MD法使用時）

片・双方向MD法では、コピー用紙・透写紙及び漢字・カタカナに拘わらず標本間ED法より格段に高いTNMR（模倣検出率）が得られている。特に、原本に酷似してくる透写紙の場合ですら自然筆跡に対するTNMR（別人正答率）の約5%程度（1文字平均の場合）の低下で模倣を検出できている。結果として、模倣検出率が99.9%以上となる識別に使用する文字数は、コピー用紙による透写筆跡（図11）については、漢字の場合2文字、カタカナの場合4～5文字であり、透写紙による透写筆跡（図12）については、漢字の場合2文字、カタカナの場合4文字となっている。筆跡鑑定の実利用分野では検査対象文字の数は数文字以上であることが多いことを考えると、この高い模倣検出率は自然筆跡に対する別人正答率（図10）とほとんど遜色のない値となっている。

特に透写紙による透写筆跡は、図7に示されているように、その字形を目視しただけでは、原本筆者の筆者内変動程度（参照筆者の場合は原本筆者の筆者内変動よりさらに小さい）の違いしかなく、目視しただけではその模倣筆跡を原本筆者ではない別人が筆記したものとはとても思えないという直感に反するような高い模倣検出率が得られている理由は、図9に示されているように、片・双方向MD法で相違度を計測すると、原本筆者の筆者内変動（ゆらぎ）に存在する筆者個性が考慮されるため、個々の模倣筆跡を目視したときの直感と異なり模倣筆跡について計測される相違度が、赤色の識別境界より右側に位置する程度に大きく計測されているためである。図9では、識別境界の左側に位置する大きさの相違度で計測されて模倣筆者が筆記したにも拘わらず原本筆者が筆記した筆跡であると誤識別されるものはほとんど存在していないことを確認できる。

6. おわりに

従来の筆跡のパターン情報（字形）に基づく筆者異同識別法では、自然筆跡に対しては実利用可能なレベルの高い筆者

異同識別性能が得られることが報告されている。しかし、字形が似てくる模倣筆跡に対しては原理的に脆弱なのではないかと危惧される。ところが、パターン情報に基づく筆者異同識別法でありながら、筆跡の“ゆらぎ”に潜在している筆者個性を活用する片・双方向MD法は、模倣筆跡に対しても高い耐性を持っている可能性がある。本論文では、片・双方向MD法が模倣筆跡に対してどの程度の模倣検出性能を持っているのかを明らかにした。

想定した模倣方法は、模倣の原本となる原本筆跡が手元にあり、それを見ながら模倣する臨書と原本筆跡の上に筆記する紙を重ねて、透けて見える原本筆跡をなぞり書きする透写の2種類である。ただし、模倣の動機あるいは熱意があるとは限らない一般被験者による臨書では、その模倣品質が低下する恐れがある。これを避けるために、一般的なコピー用紙を原本筆跡に重ねて微かに見える原本筆跡をなぞり書きしてもらった。すなわち、臨書レベルの品質の模倣筆跡を収集する手段としてコピー用紙による透写を行ってもらった。一方、透写については、原本筆跡を明確に視認できる製図やデザイン分野で一般に使用されている半透明の透写紙（トレーシングペーパー）を使用して透写を行ってもらった。

実験対象として収集された模倣筆跡の品質については、筆跡に関して最もスキルのある本稿の著者の1人がコピー用紙と透写紙の2種類の透写に加え、臨書も実施して得られた模倣筆跡と比較することで、収集された模倣筆跡の品質を確認した。なお、原本筆者を含む被験者数の総数は68人である。

実験対象とした文字は、「都横浜市宮」の漢字5文字と「アイウエオ」のカタカナ5文字の計10文字である。コピー用紙あるいは透写紙を使用して得られた模倣筆跡の標本数は、被験者68人中原本筆者を除く67人が上記10文字を5回筆記した3,350標本である。この標本数の模倣筆跡に対して模倣検出実験をコピー用紙あるいは透写紙を使用した場合それぞれで実施した。

注目した筆跡対の相違度の計測方法は、筆跡の“ゆらぎ”に潜在する筆者個性を活用しない従来法としての標本間ED法と、“ゆらぎ”に潜在する筆者個性を活用する片・双方向MD法である。異同識別は、平均識別精度が最小となる識別境界をノンパラメトリックに決定するKS識別法を自然筆跡の筆者内・間変動分布に適用することで行った。

原本筆者の筆跡と模倣筆者の筆跡それぞれが別人により筆記されたものと正しく識別する割合を表すTNMR（自然筆跡については別人正答率、模倣筆跡については模倣検出率）を求めた。従来法としての標本間ED法であっても、模倣筆跡がコピー用紙による透写筆跡（すなわち臨書レベルの模倣品質）であり、対象文字が漢字であれば80%前後の模倣検出率が得られる。しかし、同じコピー用紙による透写筆跡であってもカタカナの場合は40%前後に低下し、さらに字形が酷似してくる透写紙による透写筆跡に対しては漢字・カタカナとも模倣検出率は35%以下に激減してしまうことを確認した。

これに対して、片・双方向MD法で相違度を計測すると、コピー用紙による透写筆跡であっても透写紙による透写筆跡であっても、漢字の場合2文字を識別に使用すれば模倣検出率は99.9%以上となった。カタカナの場合4~5文字を使用すれば同様に99.9%以上となることがわかった。これは自然筆跡に対する別人正答率とほぼ変わらない性能である。すなわち、字形が類似してくる模倣筆跡が検査対象筆跡であっても、字形の違いに基づく筆者異同識別法であるにも拘わらず、自然筆跡とほぼ同等の筆者異同識別性能が得られるという模倣筆跡を目視したときの直感に反するような驚きの性能ともいえる。

研究開始当初の期待を超えるこの高い模倣検出性能は、模倣筆跡向けに特化した検出方法により得られたものではなく、片・双方向MD法を自然筆跡に対する場合と同じように適用するだけで、自然とその性能で模倣が検出されることを意味している。したがって、片・双方向MD法は、検査対象が自然筆跡だけでなく模倣筆跡であっても不安なく利用可能であり、実利用性の向上に貢献するものと考えられる。

また、本研究における模倣筆跡の模倣品質の確認や相違度分布計測、模倣検出実験をとおして、従来不明であった模倣筆跡に関する興味ある様々な特性を定量的・客観的に明らかにすることができた。例えば、(1)コピー用紙への透写（臨書相当の模倣筆跡）では、原本筆跡に類似してくるが原本筆者の筆者内変動の平均値の1.6倍程度（漢字の場合）、1.5倍程度（カタカナの場合）の相違が残存する。模倣筆者の筆者個性は、自然筆跡の筆者内・間変動分布の平均値の差を模倣筆者の筆者個性とすると、漢字の場合30%、カタカナの場合70%程度消失する。(2)透写紙への透写では、目視では原本筆者の自然筆跡と区別できない程度に類似してくるが、複写機で複写したようには類似せず、原本筆者の筆者内変動の平均値の1.3倍程度（漢字の場合）、1.4倍程度（カタカナの場合）の相違が残存する。一般自然筆跡の筆者内・間変動分布の平均値の差を模倣筆者の筆者個性とすると、筆者個性は漢字の場合70%程度、カタカナの場合80%程度消失する。

特に、あるべき“ゆらぎ”が無い、あるいは異常に小さいという現象が標本間ED法により観測された場合、その筆跡は人の書字行動を経ずに電子的・機械的に複製された模倣筆跡、あるいはスキルある筆者による透写などによる高品質な模倣筆跡であることを疑うべきであるという知見が得られた。本稿では不自然なほど類似している模倣筆跡についてのこの知見を利用してはいないが、実利用の際には片・双方向MD法に加え標本間ED法も併用することで、この知見を有効利用することが可能である。

なお、本稿では実利用において最も扱うことが多い漢字と字画構成が単純な代表例としてのカタカナの2文字種について検討した。数字やひらがなについては検討しなかったが、これについては今後の課題としたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの被験者の方から筆跡サンプルを提供していただいた。また、東海大学情報技術センター・研修生の森圭美氏には本研究の端緒となる研究活動をしていただいた。さらに、東海大学情報技術センター・前所長の中島孝氏および現所長の内田理氏には研究環境の支援をいただいた。深く感謝します。

参考文献

- 吉村ミツ、吉村功: “筆者認識研究の現段階と今後の動向”, 電子情報通信学会技術報告, PRUM96-48, pp.81–90 (1996).
- 山崎恭、近藤維資、小松尚久: “筆跡情報に重み付けを施した筆者照合方式”, 画像電子学会誌, Vol. 23, No. 5, pp. 438–444 (1994).
- 清田公保、櫻井敏彦、山本眞司: “ストローク代表点の相対的位置情報に基づく視覚障害者用オンライン文字認識”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 3, pp. 715–723 (1997).
- 吉村ミツ、吉村功: “DP マッチング法の逐次適用による日本字署名のオフライン照合法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2259–2266 (1998).
- 高澤則美: “筆跡鑑定”, 科学警察研究所報告法科学編, Vol. 51, No. 2, pp. 1–11 (1998).
- 尾崎正弘、足達義則、石井直宏: “ファジィ理論を用いた筆者識別”, 電気学会論文誌 C, Vol. 120, No. 12, pp. 1933–1939 (2000).
- 安藤慎吾、中島真人: “オフライン署名照合における局所的な個人性特徴のアクティブ探索法”, 電子情報通信学会論文誌, No. J84-D-II, No. 7, pp. 1339–1350 (2001).
- 梅田三千雄、三好建生、三崎揮市: “自己想起型ニューラルネットワークによる筆者識別と照合”, 電気学会論文誌 C, Vol. 122, No. 11, pp. 1869–1875 (2002).
- 澤田武志、大橋剛介、下平美文: “視覚の誘導場理論を用いたテキスト独立型筆者照合法”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 7, pp. 1124–1126 (2002).
- 田中敬子、安藤慎吾、中島真人: “局所的なストローク方向に着目したオフライン署名照合”, 電子情報通信学会技術報告, PRMU2002-243, pp. 1–6 (2003).
- 吉田公一, 筆跡・印章鑑定の実務, 東京法令出版, pp.54–190 (2004).
- 福井隆文、梅田三千雄: “背景伝搬法による手書き漢字認識”, 電子情報通信学会技術報告, PRMU2007-233, pp. 111–116 (2008).
- 上田勝彦: “日本字筆跡の変動解析と筆跡個性に関する基礎的検討”, 情報処理学会研究報告, 2008-CH-77(5), pp. 27–34 (2008).
- 阿久津恵子、笠村秀明、吉野晴彦: “文字の輪郭と曲線の特徴量に基づいた筆者の異同識別”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2011), pp. IS2-3:525–528 (2011).
- 常盤公徳、福江潔也、曾根光男、長幸平、松前義昭: “日本語全般を対象とする字形のみに基づく筆者異同識別法の提案とその識別特性”, 画像電子学会誌, Vol. 42, No. 3, pp. 374–383 (2013).
- 常盤公徳、岩下晋治、福江潔也、長幸平: “筆跡のゆらぎに潜む筆跡個性を活用した筆者異同識別”, 画像電子学会誌, Vol. 53, No. 2, pp. 110–120 (2024).
- J. A. Black: “Simulated Signatures: Forgery by Imitation”, Journal of Forensic Identification Vol. 45, Issue 3, pp.283–297(1995)
- 岩下晋治、常盤公徳、福江潔也、長幸平: “筆跡の各部位の筆者内・間変動と筆者識別に重要な部位”, 画像電子学会誌, Vol. 52, No. 4, pp. 539–547 (2023).

(2025年2月11日受付)

(2025年9月7日再受付)

古川 諒

2020年 東海大学工学研究科電気電子工学専攻修了。東海大学情報技術センター臨時職員。筆跡に関する技術開発に従事。工学修士。



岩下晋治

1992年 電子開発学園鹿児島情報専門学校卒業。現在 東海大学情報技術センター技術員。画像処理応用の技術開発に従事。



常盤公徳

1992年 東海大学大学院工学研究科光工学専攻博士前期課程修了。2013年 同大学院地球環境科学研究科地球環境科学専攻博士課程修了。1992年 警視庁入庁、科学捜査研究所にて鑑定業務に従事。工学博士。



福江潔也 (正会員)

1982年 東海大学工学研究科光工学専攻博士課程修了、1999年 東海大学総合科学技術研究所教授、2009年 東海大学情報理工学部教授を経て、現在 東海大学情報技術センター客員教授、画像処理、リモートセンシング、バイオメトリックスなどの研究に従事。工学博士。



長幸平

1981年 千葉大学大学院工学研究科修士課程修了、1982年より(財)リモート・センシング技術センター研究員。1992年 東海大学講師。現在 同大情報技術センター特任教授。日本写真測量学会副会長。リモートセンシングの研究に従事。工学博士。



第9回アレキサンダー・ベイン賞 授賞報告

The Report of the Ninth Ceremony of Alexander Bain Award

ベイン賞選定委員会

Alexander Bain Award Committee

1. まえがき

『アレキサンダー・ベイン賞』は今から12年前に画像電子学会に創設された本学会で最も権威のある表彰である。その創設の経緯については本学会誌通巻225号(Vol.42, No.4, pp.509~511)の報告記事をご参照いただきたい。また、今回も含めたこれまでの表彰式形式、受賞者のリストを表1に掲げる。

本年度は選定委員会において、第9回受賞者として高橋時市郎フェロー並びに河村尚登フェローの二名を選出し、令和7年6月17日の総会で発表した。表彰式は、さいたま市埼玉大学で開催された第53回年次大会二日目の令和7年8月26日17時45分より、会場である総合研究棟1号館1階のシアター教室で行われ、受賞者はいずれも現地で参加された。受賞者の功績内容(サイテーション)は以下の通りである。

高橋時市郎氏：『CG及びXRの先進的研究の推進と学会への貢献』

河村尚登氏：『画像出力関連処理技術の研究開発推進と学会への貢献』

表2・3に両氏のご略歴の抜粋を掲げる。

2. 表彰式次第

当日の表彰式は、岩崎慶年次大会実行委員長の開式挨拶に続き、高村誠之会長より受賞者に対する表彰状の読み上げと記念メダルの授与が行われた。(写真1・2参照)

その後受賞者よりスライドを用いたご講演を頂戴した。その講演要旨を次頁に掲げる。

最後に岩崎年次大会実行委員長より閉会の挨拶があり約30分で閉会した。式典には多くの年次大会参加者に列席いただいた。また、両受賞者にはその後に開かれた年次大会懇親会にもご出席をいただいた。

3. まとめ

これまでの本表彰式の実施形態を振り返ると、表1に示すように第1回から4回までは通常の理事会の終了後に行っている。第5回はコロナ禍の下で初の実施となり、オンライン開催となった年次大会に総会及び本賞の表彰式が組み込まれ、総会に先立ち、総会と同一会場で実施した。また、受賞者2名には総会の会場にご臨席いただき、表彰状・メダルの授与に続き、その場でご挨拶も賜り、オンラインでの年次大会参加者にも公開するという形式で行われた。

第6回から総会と年次大会とが切り離され、本賞の表彰式は年次大会(ハイブリッド形式)で行うことになり、第6回は受賞者のお一人が現地で、もうお一人がオンラインで参加され、第7回は、受賞者お二人とも現地参加いただき、第8回は受賞者がお一人でオンライン出席された。

今後も、年次大会と総会の分離が続くと想定されており、引き続き多くの参加者が見込める年次大会の場を授与式に選ぶことになるであろう。今回は首都圏での年次大会開催となったため受賞者には現地でのご出席をいただけたが、来年は年次大会の地方開催が予定されており、オンラインでの出席を前提とし、より盛り上がる実施形式の検討が望まれるともいえる。

表1 表彰式と受賞者

	表彰式	併催	受賞者(敬称略)
第1回	2013年5月17日	理事会	窪田啓次郎 小林一雄 梶光雄
第2回	2015年5月15日	理事会	安田靖彦
第3回	2016年5月13日	理事会	尾上守夫 南敏
第4回	2018年7月20日	理事会	釜江尚彦 富永英義
第5回	2021年6月25日	オンライン 総会・年次大会	西田友是 小宮一三
第6回	2022年9月1日	ハイブリッド 年次大会	小野文孝 松本充司
第7回	2023年8月29日	ハイブリッド 年次大会	羽鳥好律 近藤邦雄
第8回	2024年8月27日	ハイブリッド 年次大会	松木真
第9回	2025年8月26日	年次大会	高橋時市郎 河村尚登

写真1 高橋時市郎 氏への表彰状とメダルの授与



高橋時市郎氏 ご挨拶要旨

この度「CG（コンピュータグラフィックス）およびXR（拡張現実感）の先進的研究の推進と学会への貢献」により、名誉あるアレキサンダー・ペイン賞を賜りましたこと、誠に光栄に存じます。心より御礼申し上げます。

CG研究は1984年に、NTT基礎研究所で開始いたしました。当時は写実的画像生成が主流で、Ray TracingやRadiosity法の高速化が主要な技術課題でした。その中で、東京農工大学（現・名誉教授）斎藤隆文先生と進めた研究は、非写実的画像生成、すなわちヒトが描く多様な絵を生成するフレームワーク G-bufferに関するものでした。ACM SIGGRAPH 1990での論文発表では、会場から拍手喝采を頂き、CG研究の新たな可能性を示す象徴的な瞬間となりました。

1990年代には、職場や組織、学会の垣根を越えた連携が進み、工学院大学（現・名誉教授）南敏先生のご英断により、本学会に「Visual Computing（VC）研究会」が誕生しました。私もその運営に設立時より携わってまいりましたが、この活動は盛会を重ね、現在もCG分野の先端を牽引し続けております。このVC研究会の活動が実を結んだのは、本学会からの物心両面にわたる温かく力強いご支援の賜物であり、深く感謝申し上げます。

2013年からは、本学会をはじめとする関係団体と共に「映像表現・芸術科学フォーラム」の開催をお手伝いしました。毎回百名を超える参加者が集い、分野を越えた活発な議論が交わされる場として定着しています。このような学会のアクティビティに関しても少しは貢献できたのではないかと思っております。

私は本学会設立時の基幹技術であるファクシミリとは直接のご縁はございませんでしたが、今回の受賞は、NTT退職後に移った東京電機大学の初代学長であり、ファクシミリの生みの親でもあられた丹羽保次郎先生のお導きによるものでしょうか。受賞は驚きでもありましたが同時に大変うれしく存じております。

最後に私のこれまでの研究・学会活動を支えてくださった皆様に深謝申し上げると共に、常に新しい研究分野を開拓してやまない本画像電子学会の益々のご発展を祈念致します。また、何より、共に研究に励んだ東京電機大学の卒業生および現役生の皆様に心より御礼申し上げます。

表2 高橋時市郎氏 ご略歴

1977年	新潟大学工学部電子工学科 卒業
同年～2003年	日本電信電話公社入社。電気通信研究所、基礎研究所でパターン認識、ヒューマンインターフェース研究所でコンピュータグラフィックスの研究に従事。サイバーソリューション研究所においてe-ラーニングシステムの研究開発・実用化に従事。
2003年～2007年～	東京電機大学工学部情報メディア学科教授。東京電機大学未来科学部情報メディア学科教授。Visual Computingの教育・研究に従事
2010年～2016年	産官学交流センター長
2016年～2018年	研究推進社会連携センター長
2025年	同大学定年退職
現在	アストロデザイン㈱技術顧問。 東京電機大学名誉教授・研究員
学会・委員会活動歴：	
1994年 本学会Visual Computing研究会設立とVisual Computingシンポジウムの開催・運営。	
1994～1998年 同研究会幹事。2006年 本学会年次大会プログラム委員長。2010～2012年 本学会副会長。	
2016・2017年 Visual Computing/グラフィックスとCAD合同シンポジウム実行委員長。2018年 ACM SIGGRAPH Asia 2018 Featured Sessions Co-Chair。	
本学会、ACM SIGGRAPH、映像情報メディア学会、芸術科学会、日本木材保存協会 各会員。	
受賞歴：	
1992年 情報処理学会論文賞。	
1996年 情報文化学会賞 国際論文賞。	
2014年 本学会フェロー。	
2019年 映像情報メディア学会フェロー。	
IWAIT 2016・2017・2021 Best Paper Award 等	

写真2 河村尚登 氏への表彰状とメダルの授与



河村尚登 氏 ご挨拶要旨

この度は「画像出力関連処理技術の研究開発推進と学会への貢献」という趣旨で名誉あるアレキサンダー・ペイン賞を賜り、誠に有難う御座います。

私は大学院を出て、企業に入社以来、種々の画像応用・入出力装置の製品開発に携わってきました。当時は多くの画像装置メーカーが市場で製品技術を競い合っていましたが、画像の高画質・高精細化技術、デジタルハーフトーニング技術、色再現技術等の共通基盤技術については企業や研究機関から諸学会に、多数の技術成果が発表されておりました。これらの技術情報の浸透・共有化と、本分野における国内産業の技術水準の向上が学会の大きな役目であると考えた私は、本学会の編集委員として最新テーマの連載技術解説の企画や、本学会編の「カラー画像処理とデバイス」、「カラーマネジメント技術」の書籍化などに、関連企業や大学の先生方にお声掛けをして取り組み、自らも独自技術の展開や技術サービスに尽力いたしました。

また、画像通信装置の開発には国際標準化が重要であることから、高精細化に必須の画像圧縮技術といえる JBIG や JPEG2000 の国際標準化作業に参画しました。特に、JPEG2000 では標準化で避けて通れない特許問題について、画像電子学会協賛の下で国内に IP 分科会を立ち上げ、小野主査の下で「No more JPEG！」を旗印に、多くの国内企業や関連団体と協力し知財問題発生の予防と対処にあたりました。また日本発の標準化 part の制定にも協力し、おかげで JPEG2000 については特許問題が生じることはありませんでした。

以上のように、普段は競合関係にある企業同士が、当学会を通して情報の周知・共有化や、共通課題への協働的対処を図り、製品の技術水準の向上、国内産業の国際的競争力の強化につなげられたことは極めて喜ばしく、その成果に微力ながら貢献できたことを誇りに思っております。

本学会をベースとし、多くの方々のご協力のもとでこのような活動を長期間にわたり継続できたことに、改めて心より感謝いたします。

表3 河村 尚登氏 ご略歴

1971年	九州大学理学部物理学科大学院修士課程修了
同年	キヤノン(株)入社。光学設計、画像処理、画像符号化、画像装置などの研究開発に従事。
1990年~	同社 豪州研究所出向
1996年	
2009年	同社 退職
2007年~	
2013年	宇都宮大学客員教授
2008年~	千葉大学非常勤講師
2016年	
2011年~	東京工業大学産学連携コーディネータ
2016年	
現在	カワムラ・テクノラボにて技術コンサルタントを行う
学会・委員会活動歴 :	
本学会編集理事、編集幹事、年報担当幹事、事業企画室長	
ISO/IEC JTC 1/SC29 JBIG/JPEG 委員会委員	
受賞歴 :	
2010年 本学会最優秀論文賞	
2011年 本学会フェロー	
2012年 シニア研究奨励賞 他	

2025 年度 第 53 回 画像電子学会年次大会報告

岩崎 慶 (年次大会 実行委員長)

埼玉大学

The Report of IIEEJ Media Computing Conference 2025

Kei IWASAKI (Chair, IIEEJ Annual Conference)

Saitama University

1. はじめに

2025 年度第 53 回画像電子学会年次大会は、2025 年 8 月 25 日(月)から 27 日(水)に埼玉大学で開催された(写真 1)。本大会は本学会が主催、国立大学法人埼玉大学が後援、日本画像学会、日本写真学会、日本印刷学会の協賛によって開催された。また、大会スポンサーとして株式会社リズのご協力を得た。本大会の参加者は 113 名に上り、大変盛況であった。その内訳を表 1 に示す。以下では本年次大会について報告する。

2. 大会概要

2.1 年次大会会場および実施概要

本年度の年次大会の会場を提供いただいた埼玉大学は、JR 南与野駅もしくは北浦和駅からバスで約 20 分であり、都内から 1 時間程度という良好なアクセスの地で開催できた。講演発表は主に総合研究棟の 2 部屋(シアター教室と 11 番教室)を用いて行い、ポスターセッションのみ、同じく展示ホールで行った。本大会は、現地参加を基本とし、やむを得ない講演者のみオンラインでの発表とした。

本大会では昨年の年次大会¹⁾を踏襲し、Conference Track と Journal Track を設定した。Journal Track では大会原稿と共に

ジャーナル論文を学会誌に投稿いただき、通常と同様の査読を経て採録された論文を画像電子学会誌 2026 年 1 月発行の年次大会 JT 論文特集号に掲載の予定である。

本大会は例年通り特別講演、通常講演のほか表彰式、アレキサンダー・ペイン賞授与式から構成された。また、懇親会は 2 日目の午後 6 時よりキャンパスにある「バル・メリンの森」で実施した。なお、参加登録と論文投稿は従来通り、イベント管理サービス Peatix と EasyChair をそれぞれ利用した。

2.2 実行委員会の構成

本大会の実行委員会の体制を表 2 に示す。本表の他、企画委員会、セミナー委員会のメンバーにもご協力をいただいた。

表 1 参加者の内訳

		人数
参加者数		113
内訳	会員	39
	非会員	10
	会員学生	8
	非会員学生	44
	参与	1
	無料参加	11

表 2 実行委員会体制

実行委員長	岩崎 慶 (埼玉大学)
副実行委員長	高村 誠之 (法政大学)
	阿倍 博信 (東京電機大学)
	石博 康雄 (公立はこだて未来大学)
	佐藤 周平 (法政大学)
プログラム委員長	山本 奏 (NTT 研究所)
プログラム副委員長	駒形 英樹 (東京情報大学)
	竹島 由里子 (東京工科大学)
企画セッション委員長	平山 亮 (大阪工業大学)
	馬場 雅志 (安田女子大)
ポスターセッション委員長	茂木 龍太 (東海大学)
オンライン運営委員長	鈴木 浩 (神奈川工科大学)



写真 1 埼玉大学 (大学 HP より引用)

3. 開催状況

3.1 会議の構成

会議は特別講演2件と通常講演セッションからなり、通常講演セッションは、一般セッション、学生セッション、企画セッション、ポスターセッション、企業セッションから構成される。大会のタイムテーブルを表3に示す。

3.2 通常講演

通常講演のセッション数と発表件数を以下に示す。

[1] 一般セッション	2セッション	6件
[2] 学生セッション	6セッション	29件
[3] ポスターセッション	1セッション	11件
[4] 企画セッション	6セッション	21件
(ア) 大阪・関西万博の展示技術		2件
(イ) 建築と画像電子技術		5件
(ウ) 画像符号化と標準化 -AIの盛運-		2件

(エ) 点字考案200年	5件
(オ) 仮想空間と現実空間の融合	4件
(カ) ドローンならではの画像の世界	3件
[5] 企業セッション 1件	

3.3 特別講演

本大会では、2日目の午後に特別講演（招待講演）を2件実施した。特別講演①では、株式会社オーエルエムデジタルの四倉達夫氏（写真2）に「ANIMINSプロジェクトアニメ制作におけるAI支援技術の可能性について」と題して、アニメ制作の工程におけるAIの活用についてご講演いただいた。また、特別講演②では、東京電機大学の高橋時市郎氏から「東京電機大学におけるビジュアルコンピューティング研究の動向」と題して、研究室での取組みの中から、NPR（Non-Photorealistic Rendering）、歴史的町並みの復元、防災VR（Virtual Reality）等のご紹介をいただいた。（写真3）

表3 タイムテーブル

日付	開始	終了	シアター教室	開始	終了	11番教室	
8/25 (月)	13:15	13:30	オープニング				
	13:30	14:50	[S1] 学生（画像認識・解析1）		14:20	[P1] 企画（大阪関西万博の展示技術）	
	15:00	16:20	[S2] 学生（VR/ARアプリケーション）		16:50	[P2] 企画（建築と画像電子技術）	
	16:30	17:30	[G1] 一般（画像基礎・光学）				
日付	開始	終了	シアター教室	開始	終了	11番教室	
8/26 (火)	9:00	10:20	[S3] 学生（3Dモデル・点群）		9:50	[P3] 企画（画像符号化と標準化 -AIの盛運-）	
	10:30	12:00	[S4] 学生（画像認識・解析2）		12:00	[P4] 企画（点字考案200年 視覚障害者支援技術のこれまでとこれから）	
	13:30	14:30	[SP1] 特別講演1（四倉達夫氏）		展示ホール		
	14:40	15:50	[G2] 一般（画像応用）		14:40	15:50	[P5] 企画（仮想空間と現実空間の融合（AR/MR/XR）関連技術）
	16:00	17:00	[SP2] 特別講演2（高橋時市郎氏）				
	17:00	17:15	[C1] 企業セッション				
	17:15	18:00	表彰式				
	18:00	20:00			懇親会		
日付	開始	終了	シアター教室	開始	終了	11番教室	
8/27 (水)	9:30	10:50	[P5] 企画（仮想空間と現実空間の融合（AR/MR/XR）関連技術）		9:30	10:50	[S5] 学生（画像認識・解析3）
	11:00	12:20	[S6] 学生（VR/AR/CG基礎）		11:00	12:20	[P6] 企画（ドローンならではの画像の世界）
	12:20	12:30	クロージング				

4. まとめ



写真2 特別講演①の四倉達夫氏²⁾

第53回画像電子学会年次大会に関する実施報告を簡単にまとめた。今年度は久しぶりに首都圏での開催となり、この数年と比べると開催地の魅力という点からの集客は難しかったが多くの会員にとってアクセスがよかつたこともあって、盛会の裡に終えることができた。最後になったが本大会が無事に開催できたのは、ひとえに大会実行委員の皆様、事務局の皆様、並びにご支援を賜った関係者の皆様のおかげである。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 佐野 瞳夫: “2024年度 第53回 画像電子学会年次大会報告”, 画像電子学会誌, Vol.53, No.4, pp.279–282 (2024).
- 2) <https://tech.imagicagroup.co.jp/interview-yotsukura/>



岩崎 慶 (正会員)

2004年3月東京大学大学院新領域創成科学研究科博士課程修了。2023年4月より埼玉大学大学院理工学研究科教授。現在に至る。2023年から2025年まで画像電子学会副会長を務める。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。

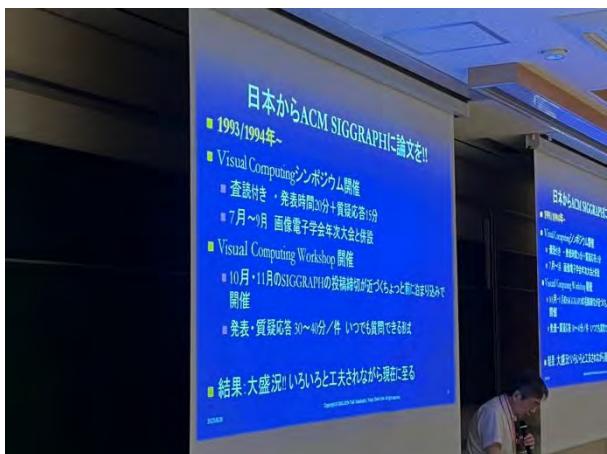


写真3 特別講演②の様子

3.4 表彰式・ペイン賞授賞式

画像電子学会においてこの1年で認められた顕著な業績を表彰する表彰式が、恒例により年次大会の中で挙行された。内容はフェロー称号授与、2024年度研究奨励賞・優秀研究賞、研究会若手奨励賞の表彰であり、その対象者は本年7月号の画像電子学会誌をご参照頂きたい。なお、画像電子技術賞は今年度は該当無しであった。

表彰式に続き、アレキサンダー・ペイン賞の授賞式が挙行された(本号で別途紹介記事掲載)。受賞されたのは特別講演もご担当いただいた高橋 時市郎氏[CG及びXRの先進的研究の推進と学会への貢献]と、河村 尚登氏[画像出力関連処理技術の研究開発推進と学会への貢献]で、表彰状・メダルの授与に続き、記念のご講演を頂戴した。

拓殖大学 藤堂研究室

藤堂 英樹 (正会員)

拓殖大学

Todo Lab., Takushoku University

Hideki TODO (*Member*)

Takushoku University

1. はじめに

拓殖大学は、1900年に創立された台湾協会学校を前身とし、長い歴史と伝統を有する大学である。現在は商学部、政経学部、外国語学部、国際学部、工学部を擁し、学際的かつ実践的な教育・研究を展開している。工学部には機械システム工学科、電子システム工学科、情報工学科、デザイン学科が設置されており、情報技術やものづくりを通じて次世代を担う技術者を育成している。当研究室は、2022年4月に開設された、まだ新しい研究室であり、工学部 情報工学科および大学院 工学研究科 情報・デザイン工学専攻に所属し、八王子国際キャンパス（東京都八王子市）に位置している。2025年度現在で准教授1名、修士課程2名、学部4年生10名、学部3年生2名の合計15名が在籍している。本稿では、当研究室の研究内容を簡単に紹介する。

2. 研究内容

筆者はこれまで一貫してコンピュータグラフィックス、とりわけノンフォトリアリスティックレンダリング（NPR: Non-Photorealistic Rendering）を専門とし、3DCGを活用した映像表現・制作支援技術に関する研究に従事してきた。近年は、手描き特有のストローク描写やタッチを3DCG映像に合成する「ストローク転写技術」や「スタイル転写技術」の開発に注力している。以下では、当研究室における最近の研究成果をいくつか紹介する。

2.1 表面モデル向けのストローク転写技術¹⁾

アニメーションや映画制作では、絵画的なタッチを映像に取り込む試みが盛んに行われている。たとえば映画『Loving Vincent (邦題: ゴッホ 最期の手紙)』では、ゴッホ風の油彩画を映像化するために、100名を超えるアーティストが64,000枚を手描きで仕上げている。一方で3DCGにおいては、アニメ風の陰影を再現するトーンシェーディングが広く用いられているものの、あくまで陰影表現にとどまり、筆致（ストローク）そのものを自動的に描き出すことはできない。

そこで、本研究では、3DCGアニメーションに対してスト

ローク一本一本を自動合成する「ストローク転写技術」を提案した。図1に示すように、アーティストが下絵となる3Dレンダリングの上にお手本のストロークを描くと、システムはその描かれ方を学習し、3Dモデル表面上にストロークを合成できる。学習においては、輝度や曲率といった3Dモデルから計算可能な特徴量を手がかりとしており、新しい照明条件や視点に応じてこれらを再計算することで、時間連続に変化するストロークをアニメーションとして自動生成できる。

この技術により、従来は人手に依存していた膨大な筆致表現を効率化しつつ、一貫した形でアーティストの画風を映像全体に展開できる。本成果は、SIGGRAPH 2022 Technical Papers (Conference Paper) に採択されている。

図1 3D表面モデルへのストローク転写結果¹⁾Fig. 1 Stroke transfer results on a 3D model¹⁾2.2 関与媒質へのストローク転写技術の拡張²⁾

本研究ではさらに、表面モデル向けに開発したストローク転写技術を拡張し、煙・炎・雲といった関与媒質（ボリューム表現）に対してもストロークを自動合成できるようにした。表面モデル向けの枠組みをそのまま適用することは困難であるため、ボリューム表現に適した特徴量の定義と可視面への投影を導入することで、表面モデルの場合と同様にストロークの描かれ方を学習・合成できるようにした。

図2に示すように、本手法は炎や雲など、透過構造を持ち、かつアニメーションを通じて動的に形状が変化する対象にも有効である。さらに、霧がかかった森のように表面モデルと

ボリューム構造が組み合わされたシーンにも対応可能である。この拡張により、表面モデルとボリューム構造を統一的に扱えるようになり、映像制作に求められる表現対象を幅広くカバーできるようになった。この成果は、SIGGRAPH 2025 Technical Papers (Conference Paper) に採択されている。



図 2 関与媒質に対するストローク転写結果²⁾
Fig. 2 Stroke transfer results for participating media²⁾

2.3 映像制作に向けたスタイル転写技術の実践応用³⁾

最後に、映像制作会社との共同研究成果である実制作に向けたスタイル転写技術の応用事例を紹介する。スタイル転写技術は研究分野においてこれまでにも数多く提案されてきたが、実際の制作現場での応用事例は限られている。

そこで本プロジェクトでは、古典的なテクスチャ合成を基盤技術としつつ、制作のニーズに合わせた実用的なスタイル転写パイプラインを構築した。具体的には、複数色マテリアルへの安定的な転写や、アニメーションにおける時間的連続性の向上を目的とした改良を行った。図3に示すように、本手法により水彩画、油彩画、鉛筆画、パステル画といった多様なタッチを3DCGアニメーションへと自然に合成できる。

テストシーンでの検証を経て、開発したスタイル転写パイプラインを短編作品の制作に適用した。制作過程で得られた知見を反映しつつ改良・最適化を重ね、実制作に対応可能な形へと整備した。最終的に完成した映像はYouTube⁴⁾上で公開されており、水彩画風や鉛筆線画風など複数の描写スタイルを取り入れた作品に仕上がっている。この研究は、SIGGRAPH Asia 2024 Technical CommunicationsにおいてBest Paper Awardを受賞している。

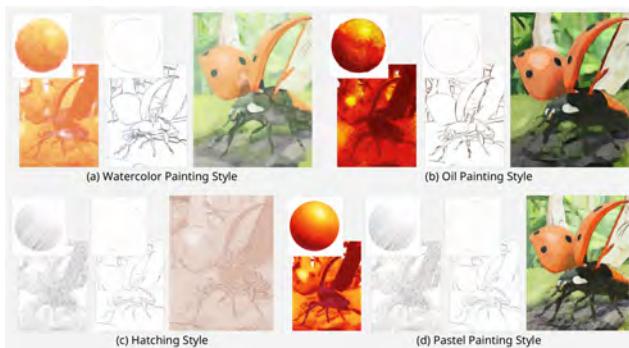


図 3 3DCG 向けの実用的なスタイル転写パイプライン³⁾
Fig. 3 A practical style transfer pipeline for 3DCG³⁾

3. NPR 技術以外の取り組み

当研究室では、3DCGを活用したNPR技術に加えて、コンピュータグラフィックスの幅広い応用にも取り組んでいる。ゲーム関連の分野では、VRを利用した体験的なシステムの開発や、複数要因を考慮したカメラ制御、さらには災害シミュレーションへの応用など、多様なテーマを扱っている。また、画像処理に基づく研究も進めており、画像変形や色変換の基礎的技術のほか、イラストと実写を自然に融合させる合成技術や、質感を強調する表現手法など、映像制作への応用を意識した研究を展開している。

さらに近年は、学科にモーションキャプチャ設備が導入されたことを契機として、人の動きを対象とした新しい研究にも着手している。運動解析やモーション合成といったテーマは今後の発展が期待される分野であり、映像制作やトレーニング支援といった幅広い応用に結びつく可能性を持っている。

4. おわりに

本稿では、当研究室の最近の取り組みを紹介した。なお、当研究室では他機関との連携を積極的に行っており、青山学院大学、九州大学、株式会社グラフィニカ、アーチ株式会社、株式会社オーラ・エル・エム・デジタルをはじめとする多くの皆様のご協力のもとに研究活動を行っている。この場を借りて関係する皆様に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Todo, H., Kobayashi, K., Katsuragi, J., Shimotahira, H., Kaji, S., Yue, Y.: "Stroke Transfer: Example-based Synthesis of Animatable Stroke Styles", ACM SIGGRAPH 2022 Conference Proceedings, 1–10 (2022).
- 2) Shirashima, N., Todo, H., Yamaoka, Y., Kaji, S., Kobayashi, K., Shimotahira, H., Yue, Y.: "Stroke Transfer for Participating Media", ACM SIGGRAPH 2025 Conference Proceedings, 1–12 (2025).
- 3) Todo, H., Koyama, Y., Sakai, K., Komiya, A., Kato, J.: "A Practical Style Transfer Pipeline for 3D Animation: Insights from Production R&D", ACM SIGGRAPH Asia 2024 Technical Communications, Article 22, 1–4 (2024), Best Paper Award.
- 4) グラフィニカ公式「Forest Tale」: https://youtu.be/EJ_vwZbOFCs



藤堂 英樹 (正会員)

2011年 東京大学大学院 情報理工学系研究科 博士後期課程 単位取得退学、2013年 博士 (情報理工学) 取得。2011年から2013年まで株式会社オーラ・エル・エム・デジタルで実務経験があり、2016年から東京工科大学、2017年から中央学院大学、2020年から青山学院大学。2022年から拓殖大学に勤務し現在に至る。一貫して映像表現・制作支援技術に関する研究に従事。本学会総務理事、画像電子学会、ACM、情報処理学会、各会員。

理事会だより

第348回 理事会

- 日時：2025年4月8日(火)17:00-18:00
- 場所：事務局を主たる場所としてオンライン（ZOOM）併催
- 出席者：理事22名

総出席者：26名

【会長】高村 【副会長】 岩崎、山本、佐藤、内田

【編集】新田、向井 【企画】石榑、馬場、佐野、窪田、菅野

【財務】中村、渡部、西村、阿倍 【総務】志水、茂木

【技術専門】北原、杉田、濱田、丸山 【地方】甲斐

【監事】金盛

＜オブザーバ＞ 小野元会長 ＜事務局＞ 浮ヶ谷、大嶽

4. 議題・資料

	担当	付番
(1)前回議事録確認	＜佐藤副会長＞	348-001-01

議題

(1) 議題1： 第53回年次大会速報	＜岩崎副会長＞	348-002-01
(2) 議題2： AIS2025進捗について	＜北原技術専門理事＞	348-003-01
(3) 議題3： IEVC2026の進捗について	＜内田副会長＞	348-004-01
(4) 議題4： 終身会員の選定について	＜小野元会長＞	348-005-01
(5) 議題5： 第54回総会資料について	＜事務局＞	348-006-01

報告

(1) 報告1： 編集委員会報告	＜内田副会長＞	348-007-01
(2) 報告2： 企画委員会報告	＜石榑企画委員長＞	348-008-01
(3) 報告3： 2025年秋季大会について	＜事務局＞	348-009-01
(4) 報告4： フェロー候補、アレキサンダー・ペイン賞、技術賞 推薦状況	＜事務局＞	348-010-01
(5) 報告5： 理事会開催年間予定	＜事務局＞	348-011-01

5. 議事 司会：佐藤副会長、議事録：志水総務理事

第349回 理事会

- 日時：2025年5月23日(金)17:00-18:00
- 場所：事務局を主たる場所としてオンライン（ZOOM）併催
- 出席者：理事21名

総出席者：24名

【会長】高村 【副会長】 岩崎、山本、内田

【編集】新田、向井、石川 【企画】馬場、佐野、窪田、菅野

【財務】中村、渡部、西村、阿倍 【総務】志水、茂木

【技術専門】北原、杉田、濱田、丸山

【監事】深見、金盛

＜オブザーバ＞ 小野元会長 ＜事務局＞ 浮ヶ谷、大嶽

4. 議題・資料

	担当	付番
(1)前回議事録確認	<内田副会長>	349-000-01
議題		
(1) 議題1： 第53回年次大会進捗	<岩崎副会長>	349-001-01
(2) 議題2： AIS2025進捗	<北原技術専門理事>	349-002-01
(3) 議題3： 終身会員（追加申請者）の選定について	<事務局>	349-003-01
(4) 議題4： 第54回総会資料について	<事務局>	349-004-01
報告		
(1) 報告1： 編集委員会報告	<内田副会長>	349-005-01
(2) 報告2： 企画委員会報告	<石榑企画委員長>	349-006-01
(3) 報告3： 事務局より	<事務局>	349-007-01

5. 議事 司会：内田副会長、議事録：事務局

第 350 回 理事会

1. 日時：2025年6月17日（火）17：40－18：10

2. 場所：中野会場ならびにZoomによるオンライン開催

3. 出席者：理事29名

総出席者：32名

【会長】高村 【副会長】 岩崎（旧）、内田、藤澤（新）、山本（新）

【編集】新田、今給黎（新）

【企画】窪田（旧）、石榑、馬場（新）、澤口（新）、菅野（新）、河合（新）

【財務】渡部（旧）、阿部、北本（新）、西村（新） 【総務】志水、鈴木、茂木（新）

【技術専門】北原（旧）、濱田（旧）、丸山、早瀬（新）、金澤（新）、草野（新）

【地方】甲斐（新）、藤井（新）

【監事】深見（旧）、金盛（新）

<事務局> 浮ヶ谷、大嶽

4. 議題・資料

報告事項	担当	付番
(1) 総会の報告	<高村会長>	総会資料
(2) 自己紹介（退任・留任・新理事、監事）	<全員>	総会資料
(3) 法人登記書類提出（住民票等）のお願い	<事務局>	—

5. 議事 司会：山本副会長、議事録：事務局

第 351 回 理事会

1. 日時：2025年7月28日(月)17:00-18:00

2. 場所：事務局を主たる場所としてオンライン（ZOOM）併催

3. 出席者：理事24名

総出席者：31名

【会長】高村 【副会長】 内田、山本、藤澤

【編集】新田、向井、石川 【企画】石榑、馬場、河合、澤口、菅野

【財務】北本、西村、阿倍 【総務】志水、茂木、鈴木、藤堂

【技術専門】金澤、丸山、草野、早瀬 【地方】藤井

【監事】竹島、金盛

<オブザーバ> 小野元会長
<年次大会実行委員長> 岩崎

<次期会長> 土橋
<事務局> 浮ヶ谷、大嶽

4. 議題・資料

(1)前回議事録確認

担当	付番
<山本副会長>	351-001-01

議題

(1) 議題1： 年間スケジュール確認	<事務局>	351-002-01
(2) 議題2： 理事職務内容確認	<事務局>	351-003-01
(3) 議題3： 第53回年次大会進捗	<岩崎実行委員長>	351-004-01
(4) 議題4： IEVC2026進捗	<内田副会長>	351-005-01

報告

(1) 報告1： AIS2025実施報告	<丸山技術専門理事>	351-006-01
(2) 報告2： 編集委員会報告	<内田副会長>	351-007-01
(3) 報告3： 企画委員会報告	<石榑企画委員長>	351-008-01
(4) 報告4： 画像関連学会合同秋季大会について	<事務局>	351-009-01
(5) 報告5： 法人登記用書類について	<事務局>	351-010-01
(6) 報告6： 理事会日程について	<事務局>	351-011-01

5. 議事司会：山本副会長、議事録：鈴木総務理事

会員各位

＜お知らせ＞

画像電子学会

「会員用 Web」への登録実施のお願い および、会費の口座振替特典終了のお知らせ

当学会では 2026 年度より会費精算を会員用 Web での支払に統一致します。これに伴い、会費の口座振替（自動引落し）の場合の 10% 割引（10,000 円 → 9,000 円）の特典が終了となります。

「会員用 Web」への登録実施のお願い

当学会では、現在「会員用 Web（シクミネット）」を開設しておりますが、2026 年度より会費の精算が会員用 Web に統一されます。つきましては、以下の会員用 Web にアクセスいただき、会員登録の作業を実施頂きますよう、よろしくお願ひ致します。

<https://iiej.shikuminet.jp/login/>

会員の皆様にはすでに 9 月 26 日付けて「画像電子学会の会員ホームページへのログイン作業のお願い」の件名でメール連絡を差し上げておりますが、ログイン ID やパスワードなど、もしご不明点がございましたら、下記のお問い合わせ先までメールにてご連絡ください。

会費の口座振替特典終了のお知らせ

これまで口座振替（自動引き落とし）の場合に会費の 10% を割引させていただきました特典を設けておりましたが、2026 年度より会費の精算を会員用 Web での決済に統一することに伴い、この特典を終了させて頂くこととなりました。

なにとぞ、ご理解のほどよろしくお願ひ致します。

《お問い合わせ先》

一般社団法人 画像電子学会

〒116-0002

東京都荒川区荒川 3-35-6 ライオンズマンション三河島第二 101 号

TEL:03-5615-2893 FAX:03-5615-2894

E-mail: gazo_iiej@iiej.org

2025年度画像電子学会研究会等予定

研究会等名	開催日	場所	テーマ	締切	記事
画像関連学会連合会 第11回秋季大会	10月27日(月)-28日(火)	名古屋大学 野依記念学術交流館 (ハイブリッド)		発表申込:締切済 原稿締切:締切済	共催
第314回研究会-高臨場 感ディスプレイフォーラム2025	10月31日(金)	電気学会会議室 (市ヶ谷)(ハイブリッド)	心を動かす・空間をつなぐ高臨場感コミュニケーション技術	参加申込締切:2025年10月28日(火)	共催
ビジュアルコンピューティングワークショップ 2025 札幌定山渓 (VCWS2025)	12月7日(日)-8日(月)	定山渓ビューホテル (北海道)		講演登録締切:2025年10月31日(金) 参加登録締切:2025年10月31日(金)	
第10回DMH研究会	2026年2月(予定)				
第315回研究会 in 北海道	2月26日(木)-27日(金)	ゆめホール知床 (北海道)(ハイブリッド)	画像一般	発表申込締切:2025年12月15日(月) 原稿締切:2026年1月26日(月)	
第316回研究会-映像表現/芸術科学フォーラム2026	3月2日(月)	東京工芸大学 中野キャンパス		発表申込締切:2026年1月16日(金) 原稿締切:2026年2月12日(木)	共催
IEVC2026 in Hiroshima	3月16日(月)-19日(木)	Hiroshima University, Hiroshima City, Japan		General Papers: 申込締切: 2025年10月31日(金)	
第54回VMA研究会/第20回 視覚・聴覚支援システム研究会	3月(予定)				
第11回DMH研究会	3月(予定)				

*研究会の場合、いずれも「画像一般」を含む

*空欄部は未定

*上記の予定は変更になる場合があります

問合せ先 〒116-0002 東京都荒川区荒川13-35-4-101

一般社団法人 画像電子学会

TEL:03-5615-2893 FAX:03-5615-2894

E-mail:kikaku@iiej.org

<https://www.iiej.org/>

<https://www.facebook.com/IIEEJ>

高臨場感ディスプレイフォーラム 2025(画像電子学会第 314 回研究会)

～心を動かす・空間をつなぐ高臨場感コミュニケーション技術～

「高臨場感ディスプレイフォーラム」は、ディスプレイやその発展形としての視覚・聴覚・触覚などに関する超臨場感技術について、技術そのものだけでなくコンテンツや応用分野も含む情報交換の場として開催されてきました。今年は「心を動かす・空間をつなぐ高臨場感コミュニケーション技術」をテーマに、感情・共感の誘発技術、AIとの共存、ホログラムや空中ディスプレイ、バーチャルヒューマン、Mixed Reality、ウェルビーイングへの貢献など、多彩な講演を予定しています。臨場感技術の未来を共に考えるこの機会に、ぜひご参加ください。

■開催日時：2025 年 10 月 31 日（金） 10:00～16:50

■開催場所：ハイブリッド（電気学会会議室* & オンライン）*東京都千代田区五番町 6-2 HOMAT HORIZON ビル 8 階 [map](#)

■参加申込 <https://forms.gle/cfCC31s6oE1VFYNU9>

■申込締切日：10 月 28 日（火）

■参加費（予稿集付）：一般：2,000 円、学生：500 円

■お振込先：10 月 29 日（水）までに以下のいずれかにお振込みください。

郵便振替：口座番号 00180-3-166232 加入者名：一般社団法人画像電子学会
みずほ銀行 浜松町支店（普）1961408 口座名：一般社団法人画像電子学会

■参加用 URL 送付日：10 月 29 日（水）予定

* 資料は研究会開催日の 1 週間前からダウンロードできます。詳しくは参加申し込みいただいた方にメールでお知らせいたします。

■プログラム

10:00 10:05 開会挨拶 山口 雅浩（東京科学大学）

10:05 10:45

1. [招待講演] 感情や共感の誘発技術がもたらす未来のコミュニケーション

谷川 智洋（東京大学）

10:45 11:25

2. [招待講演] 人と AI が共存する世界最大の人助けネットワークを創る

－ロボットを通じた新しいサービスインフラの構築－

筒 雅博（avatarin）

11:25 12:05

3. [招待講演] 自由視点ホログラム生成とホログラフィック信号変換器

○下馬場 朋禄, 聖徳 壯登† 熊野 開, 藤間 裕大, 小野 佳祐, 王 帆, 伊藤 智義 (千葉大学)

12:05 12:45

4. [招待講演] 万博での空中ディスプレイ実証と高臨場感演出の展開

山本 裕紹 (宇都宮大学)

13:15 14:45 デモ

14:45 15:25

5. [招待講演] 情報インターフェースとしてのバーチャルヒューマン

田邊 集 (TOPPAN ホールディングス)

15:25 16:05

6. [招待講演] Mixed Reality 技術がもたらすメイクアップシミュレーションの新展開

渡辺 義浩 (東京科学大学)

16:05 16:45

7. [招待講演] 踊る光、語る AI-ウェルビーイングの向上に寄与するデジタルアプローチの可能性 –

山本 哲也 (徳島大学)

16:45 16:50 閉会挨拶 徳島大学 山本 健詞

■共催/連催

映像情報メディア学会 (映像表現&コンピュータグラフィックス研究委員会, 情報ディスプレイ研究委員会, 立体メディア技術研究委員会), 画像電子学会 (企画委員会), 電気学会 (電子デバイス技術委員会), 日本バーチャルリアリティ学会, 電子情報通信学会 (電子ディスプレイ研究専門委員会), 超臨場感コミュニケーション産学官フォーラム (順不同)

■協賛 (予定を含む)

映像情報メディア学会 (ヒューマンインフォメーション研究会), S I D日本支部, 電気学会 (電子デバイス技術委員会 エモーショナルディスプレイ協同研究委員会), 芸術科学会, 3 D コンソーシアム, 最先端表現技術利用推進協会 (三次元映像のフォーラム), 照明学会 (光源・照明システム分科会), 電子情報通信学会 (画像工学研究専門委員会), 日本映画テレビ技術協会, 日本液晶学会, 日本光学会 (ホログラフィック・ディスプレイ研究会), 日本視覚学会, 日本認知心理学会, 日本基礎心理学会, 日本心理学会, 日本バーチャルリアリティ学会 VR 心理学研究委員会 (順不同)

画像電子学会 第315回研究会 in 北海道 発表募集 (2/26(木) -2/27(金) 開催)

下記により、画像電子学会 第315回研究会の発表論文を募集いたします。ご関係の各位には奮ってご応募ください。今回は現地（ゆめホール知床）とオンラインによるハイブリッド形式で実施します。画像電子学会の第一種研究会では「コメント・サービス」に加え、優れた研究発表を行った若手研究者に対して「研究会若手奨励賞」を授与する予定です。

－記－

■テーマ：

画像一般（色再現、立体映像、CG、VR、アニメーション技術、画像処理、ME関係、画像符号化など幅広く扱います。修論、卒論の発表も歓迎します。）

■開催日：

2026年2月26日(木) 13:30～18:00(予定)、2月27日(金) 9:00～13:00(予定)
(*第2日目は発表件数によりキャンセルされる可能性があります)

■会場・発表形式：

現地とオンラインのハイブリッド開催、質疑応答含み1件当たり30分前後
(実施方法や発表時間は、今後の状況により変更になる場合があります。)

■現地での発表・聴講形式：

斜里町公民館ゆめホール知床

〒099-4113 北海道斜里郡斜里町本町4

https://www.town.shari.hokkaido.jp/kosodate_kyoiku_bunka_sports/yumehallshiretoko/index.html

発表者は各自のPCにてビデオ会議システムZoomの画面共有機能により画面を共有しつつ発表を行っていただきます。発表前日までに発表者にZoomへの接続情報を電子メール等にてお送りします。(接続トラブルなどを想定し、念のため、USBメモリ等にてPowerPointファイル等を別途ご持参下さい。)

■オンラインでの発表・聴講形式：

発表者は各自のPCにてビデオ会議システムZoomの画面共有機能により画面を共有しつつ発表と質疑応答を行っていただきます。各自マイク、カメラ、スピーカーを備えたPCをご用意ください。発表前日までに発表者と参加者にZoomへの接続情報を電子メール等にてお送りします。

■申込締切日：2025年12月15日(月)

参加申込フォーム: <https://forms.gle/MMjpGefbjeQSV8tP7>

よりお申し込みください。申込受付後、原稿の執筆要項と提出方法をお送り致します。

■原稿締切日：2026年1月26日（月）

原稿の目安：A4サイズ 2段組 2~4頁

■参加費（予稿集付）：2,000円（発表数により一日開催の場合は1,000円とします）

参加申込、および、参加費の支払い方法は別途ご案内いたします。

■コメント・サービスについて：

研究会（本学会主催/共催の第一種研究会）では、発表内容がその後学会誌論文としての投稿に発展することを促進するため、発表者の希望に基づいて、当学会が指名した研究者が事前に発表者の最終原稿を読んだ上で、当日発表時に質問やコメントをし、さらに後日、コメントを発表者に送付する「コメント・サービス」を実施しています。

このサービスを活用すると、発表に関してより踏み込んだ議論が期待できますので、今回の研究会での発表内容を将来的に学会誌論文として投稿することを検討されている発表者は、申込締切後に画像電子学会より送付されるアンケートにて「コメント・サービス希望」とご回答ください。なお、本サービスの対象発表数には限りがありますので、最終原稿に基づき選抜させていただくことがあります。あらかじめご了承ください。

■研究会若手奨励賞について：

画像電子学会第一種研究会において優れた研究発表を行った若手研究者に対して「研究会若手奨励賞」を毎年若干名授与します。受賞資格は以下のとおりです。研究会奨励賞の対象者（研究会における発表登壇時において35歳以下）は発表申込み時に生年月日をご記入ください。

- 本奨励賞の受賞時において本学会会員（学生会員含む）であること。
- 研究会における発表登壇時において35歳以下であること。
- 過去に同賞を受賞したことがないこと。

■お問い合わせ先：一般社団法人 画像電子学会

〒116-0002 東京都荒川区荒川3-35-4 ライオンズマンション三河島第二101号室

TEL: 03-5615-2893 FAX: 03-5615-2894 E-mail: kikaku@iiej.org

詳細については学会ホームページで順次掲載いたします。

画像電子学会ホームページ <http://www.iiej.org/>

■その他：

当学会では研究会予稿を電子化しており、予稿（電子ファイル）の事前配布を可能とするため、予稿の公開日は研究会開催日の1週間前となる予定です。

以上

ビジュアルコンピューティング論文特集号 論文募集

画像電子学会編集委員会

ビジョンとグラフィックスの統合を目指したビジュアルコンピューティング研究委員会（現ビジュアルコンピューティング研究会）は1993年に発足し、シンポジウムおよびワークショップを通して活発な活動を行っており、そこで本年度も、表記の論文特集号を下記の要領により企画いたしました。採録論文は本学会論文賞、および、西田賞の対象にもなりますので、奮って御応募下さい。

1. キーワード

- グラフィックスの基礎（レンダリング、モデリング、形状モデル、シミュレーション）
- グラフィックスシステム（入出力デバイス、GPU、Web／モバイルシステム）
- グラフィックスの応用（マルチメディア、アニメーション、可視化、医療応用、地理情報処理）
- デジタルファブリケーション（3Dプリンタ、建築応用、デジタルエンジニアリング）
- エンタテインメント（ゲーム、エージェント・人工知能応用、インタラクション応用）
- VR 基礎・応用（複合／拡張現実、五感インタフェース、視覚心理・認知モデル）
- 画像処理（画像の表示・計測・認識等、ビジョンとグラフィックスの融合技術）
- コンテンツ処理（形状・素材データの検索／編集、異種媒体での表示）

これらに少しでも関連をもつ、より新しいまたより広い分野からの研究成果の投稿を期待しています。

2. 論文の種類と取扱い

「論文」「ショートペーパー」を受け付けます。他の種目については、編集幹事が内容を確認した上で、受け付けるかどうかを決定します。

取り扱いは通常の論文投稿と同一です。なお採録決定が特集号に間に合わなかった場合には、通常の投稿として扱います。

3. 特集号発行 画像電子学会誌 2026年10月号予定（電子版）

4. 論文投稿締切日 2026年3月23日（月）必着

5. 論文の投稿方法

論文投稿システムよりご投稿ください。

<http://www.editorialmanager.com/iiej/>

論文投稿にあたっては、下記の論文投稿の手引きをご一読ください。

<https://www.iiej.org/call-for-papers/guide-paper-submission/>

6. 問い合わせ先

画像電子学会事務局

〒116-0002 東京都荒川区荒川3-35-6 ライオンズマンション三河島第二 101号

TEL: 03-5615-2893 FAX: 03-615-2894

事務局 福島 hensyu@iiej.org

<http://www.iiej.org/>（電子投稿）

ゲスト編集委員長 土橋 宜典（北海道大）

ゲスト編集幹事 古屋 貴彦（山梨大） 謝 浩然（北陸先端大/早稲田大）

藤堂 英樹（拓殖大）

2017年1月6日改訂
2018年7月6日改訂
2020年10月2日改訂
2024年11月6日改訂
2024年12月4日改訂

論文投稿の手引き

1. 論文投稿

(1) 投稿前

- 著者は「論文投稿の手引き」、「スタイルフォーマット」を学会ホームページの「学会誌」、「英文論文誌」欄からダウンロードして、投稿論文の準備をする。
- 「スタイルフォーマット」はTeX版、Word版の2種類が準備されており、出版コストおよび出版に至る労力削減のために、TeX版の利用を推奨している。
- 原稿には以下の6種類がある。
 - 論文：画像電子技術に関する独創的な研究成果、開発結果、検討結果を学術論文（フルペーパー）としてまとめたもの。新しいアイディアの提案を目的とする通常論文であり、新規性、有用性、信頼性、了解性に基づいて評価する。原則として刷り上がり8ページ以内とする。
 - ショートペーパー：研究速報的な性格を持ち、部分的にある程度良好な結果、新しい知見が得られたことを研究報告としてまとめたもの。原則として刷り上がり4ページ以内とする。
(論文・システム開発論文のいずれとも組み合せが可能とする)
 - システム開発論文：通常論文の新規性、有用性とは別に、既存技術の組み合せ、或いはそれ自身に新規性があり、開発結果が従来法より優れているか、或いは他システムへ応用可能であり、新しい知見が示されているもの。原則として刷り上がり8ページ以内とする。
 - 資料論文：試験、運用、製造などの新しい成果をまとめたもの。あるいは現場の新技術紹介や提案などで、必ずしも独創的でなくてもよい。原則として刷り上がり8ページ以内とする。
 - サーベイ論文：新しい研究の発表を目的とせず、既存の研究・開発をある視点の下に体系付け、比較してその位置づけを明確にし、時代的な変遷を明らかにすること等を目的とする論文。参考文献の網羅、全体像の呈示、客観的評価、特定機関の宣伝に与しないことなどが要求される。また、以下の要件を満たすことが望ましい。その分野に関する状況・課題・及びそれらが、研究者や関係者に与える影響を理解していること。その分野への参入、開発・応用等への進展を促しさらには他分野への展開や新たな研究を触発する可能性を有すること。原則として刷り上がり8ページ以内とする。必要に応じて複数パート構成とすること。
 - 実践論文：事例※やフィールドワークに関する発見、工夫、既存技術の新たな組み合せなどで、事例設計の客観性・相互主観性を有し、個別の事例（フィールドワークも含む）から、他の事例（より一般的な事例も含む）への発展可能性（一般法則化）、利活用・応用可能性などを示せるもの。原則として刷り上がり6ページ以内とする。
※事例とは、画像関連技術の開発・利活用に関する、フィールドワーク、システム開発、システム導入、ソフトウェア実装、アプリケーション開発、表示・提示方法、入出力インターフェース開発、試験・評価方法、サービス、データベース作成等の実例を示す。
- 原稿の投稿および掲載の条件として、論文、ショートペーパー、資料論文、実践論文のいずれも、著者のうち必ず1名以上は本学会の正会員または学生会員であることを必要とする。
- 原稿の二重投稿を禁止する。論文、ショートペーパー、システム開発論文、資料論文、実践論文

のいずれも、その採録決定以前に投稿原稿と同一内容のものが、投稿原稿と同一の著者もしくは少なくともその中の1名を含む著者によって他の公開出版物に掲載または投稿中の場合には、原則として採録としない。公開出版物とは、内外の書籍、雑誌および官公庁、学校、会社等の機関誌、紀要などをいう。ただし、本学会または他学会（国外の学会を含む）等の年次大会、研究会、シンポジウム、コンファレンス、講演会などの予稿、特許公開公報、当学会編集委員会で認めたものなどについてはこの限りではない。また、本会誌にショートペーパーとして採録になったものについて、成果を追加し内容を充実させ、論文として再び投稿したものについては二重投稿とみなさない。

(2) 投稿

- ・ 投稿原稿では、全ての著者情報を削除すること。ただし、参考文献はこの限りではない。
- ・ 著者は以下の論文投稿のページよりユーザ登録を行った上で、ログインして必要事項の記入と「スタイルフォーマット」を使用し作成した論文原稿のアップロードを行う。論文原稿のファイルはpdf形式（TeXのdviを変換したもの）またはWord形式とする。「スタイルフォーマット」を使用するため、原則として図表等は論文原稿内に組み込む。（査読の参考となる別のファイルを同時にアップロードすることは可能）
<https://www.editorialmanager.com/iiej/>
- ・ 投稿に関して質問がある場合には、学会事務局編集担当者に相談のこと。（連絡先：〒116-0002 東京都荒川区荒川 3-35-4 ライオンズマンション三河島第二 101号 TEL: 03-5615-2893 FAX: 03-5615-2894 E-mail: hensyu@iiej.org 画像電子学会事務局編集担当）

2. 論文査読と対応

(1) 査読

- ・ 論文原稿は該当専門分野に詳しい査読者によって審査され、「採録」、「条件付採録」または「返戻」のいずれかに判定される。査読結果は、学会事務局より連絡著者宛にメールで通知される。なお、最終的な採録判定についてはショートペーパーを除き、いずれのカテゴリーの論文であっても2名以上の査読者の採録を必要とする。
- ・ 評価方法
 - 通常論文は、次の基準で評価する。
 - ✓ 新規性：投稿内容に著者の新規性があること。
 - ✓ 有用性：投稿内容が学術や産業の発展に役立つものであること。
 - ✓ 信頼性：投稿内容が読者から見て信用できるものであること。
 - ✓ 了解性：投稿内容が明確に記述されており、読者が誤解なく理解できるものであること。
 - ✓ 文献調査：投稿内容に関連する文献調査が行われており、必要な比較が行われていること。
 - ショートペーパーは、通常論文の新規性、有用性とは別に、研究内容に速報性があり、斬新性の尺度からある程度良好な結果、部分的にでも新しい知見が得られたことを評価する。
 - システム開発論文は、通常論文の新規性、有用性の代わりに次の基準で評価する。
 - ✓ システム開発の新規性：既存技術の統合であっても、組み合わせの新しさ、システムの新しさ、開発したシステムで得られた知見の新しさなどをシステムの新規性として認める。
 - ✓ システム開発の有用性：類似システムと比較し、総合的或いは部分的に優れていること。システムとして先駆的な新しい応用コンセプトが示されていること。組み合わせが実用化のために合目的最適性を有すること。性能限界や実利用システムの性能事例が示されていること。
 - 資料論文は、通常論文における新規性要件については、試験、運用、製造などの新しい成果、

現場の新技術紹介や提案など、必ずしも独創的でなくても優先性があれば新規性として認められる。また、有用性要件については新しい成果が既存技術と比較し優れており、学術や産業の発展に役立つものであればそれを評価する。

- サーベイ論文は、通常論文における新規性に代えて網羅性、俯瞰性、客観性について評価する。信頼性、了解性、及び文献調査においては、基本的に通常論文と共通の観点により評価する。
- 実践論文は、通常論文の新規性、有用性に代えて合目的性、独自性、適応性の基準で評価する。また、信頼性、了解性、及び文献調査においては、基本的に通常論文と共通の観点により評価する。(なお、5段階評価において通常論文の評価項目を流用する場合は通常論文の新規性を「合目的性」に、有用性を「独自性」に、信頼性を「適応性及び信頼性の総合」に読み替えて記入するものとする。)
 - ✓ 合目的性：投稿内容に合目的性があること。
 - ✓ 独自性：投稿内容に著者の独自性や拡張性があること。
 - ✓ 適応性：投稿内容が先行事例より優れていること。また、当該事例の合目的性に対する要求条件及び適用範囲において、当該事例が同一条件下で先行事例と比べ、複数の観点で高い客観性・相互主観性を有し、サービスの向上に貢献すること。

これらの具体的な例を以下に示す。

- ✓ 合目的性：当該事例への提案内容の導入が一定の目的にかなった方法であることが示されていること。また、分析結果の適用範囲において高い合目的性を有すること。
- ✓ 独自性：当該事例において先駆的な独自応用コンセプトが示されていること。先行事例の組み合わせであっても組み合わせの独自性、導入事例の適用範囲の独自性、事例構成の独自性、他の事例（システム、サービス）への拡張性、現状の画像電子技術に係るサービスの有効性、得られた知見の独自性などを事例の独自性として認める。
- ✓ 適応性：提案事例のもつ適応性を判断するために充分な導入分析結果及び考察が示されていること。提案事例と先行事例との適応性に関する比較結果が、共通条件下で示されていること。提案事例が先行事例と比較し、総合的或いは複数の部分で性能が優れていること、或いは課題、合目的性に対する要求条件及び適用範囲において、より高い客観性・相互主観性を有していること。

(2) 査読結果受領後の対応

- ・ 「採録」の場合、著者は最終原稿の準備（3. に記載）に進む。
- ・ 「採録（参考意見有り）」の場合、著者は査読者からの参考意見を考慮して論文を修正し、最終原稿の準備（3. に記載）に進む。
- ・ 「条件付採録」の場合、著者は査読者から示された「採録の条件」に基づき、指定された期日まで（60日以内）に論文を修正し、照会内容への対応を明記した回答書とともに再提出し、再度審査を受ける。修正論文には、修正箇所がわかるように、色を付けるか、下線を引くなどすること。また、回答書は必ず添付し、採録条件全てに対し、修正点、主張点、今後の課題などを丁寧に説明すること。
- ・ 「返戻」の場合、著者は以降のプロセスに進むことができない。査読者から示された「返戻の理由」を吟味して論文内容を再検討し、あらためて投稿することができる。

(3) 修正原稿査読

- ・ 「条件付採録」で再提出する場合は、回答書・修正清書原稿・修正箇所マーク原稿の修正原稿一

式を投稿ページより再提出する。但し、「条件付採録」で指定された期日を過ぎて提出された場合は、新規の初回投稿論文として取り扱われる所以注意すること。

- 再提出された修正原稿は原則として同一の査読者によって再審査され、「採録（参考意見付記を含む）」または「返戻」のいずれかに判定される。
- 以降の対応は（2）と同様である。

3. 最終原稿提出から出版まで

（1）最終原稿提出

- 「採録」通知受理後は、事務局から最終原稿作成に関するメールが送付されるので、著者はその指示に従い最終原稿一式（電子データ）を準備し、指定の期日までに、事務局へ送付する。
- 最終原稿一式とは、「スタイルフォーマット」を使用して作成した論文原稿のソースファイル（TeX版またはWord版）、そのpdfファイル、すべての図表のepsファイル（bmp、jpg、pngなども含む）、著者紹介用写真（縦横比3:2、胸より上、300dpi以上のepsファイル、或いは、jpgファイル）であり、これらをzip等の圧縮ファイルに格納して提出する。
- 最終論文原稿には、著者名・組織名、著者紹介、必要により謝辞を記入する。（スタイルファイル内のマクロのフラグを解除する）
- 採録が決定した著者は、当該論文の掲載料を支払わなければならない。なお、別刷りの購入は任意。（別紙1「別刷価格表」参照）

（2）ゲラ刷りの校正

- 論文掲載号の発行のおよそ1ヶ月前に論文原稿のゲラ刷り（ハードコピー）の確認が依頼される。著者は指定の期日まで（約1週間）に校正を行い、修正した原稿をスキャンしたpdfファイルを作成し、事務局へメールにて送付する。この際、「別刷り購入票」および「コピーライトフォーム」を記入し、同様にスキャンしたpdfファイルをアップロードする。
- 本会誌に掲載されるすべての記事については、電子的形態による利用も含め、著作権は原則として本会に帰属する。
- 「別刷申込書」および「コピーライトフォーム」は学会ホームページの「学会誌」欄からダウンロードする。（別紙2「別刷申込書」、別紙3「コピーライトフォーム」参照）

（3）出版

- 最終校正された論文原稿は学会誌、或いは、英文論文誌（電子ファイル形態）としてオンライン出版されるとともに、学会ホームページに掲載される。
- 著者は、グリーンオープンアクセス（セルフアーカイブ）として、本誌からの出版ののちすぐに、自身の著者最終稿を機関リポジトリなどの公的なオンラインリポジトリから公開することができる。

以上

論文賞候補論文推薦のお願い

来年度は第22回の論文賞表彰を行いますので、下記の要領で授賞候補論文をご推薦頂きたく、お願ひいたします。

推薦対象と推薦数	学会誌第53巻 第1号（通巻267号）～第54巻 第4号（通巻274号）：2024年1月～2025年10月 英文論文誌（T-IEVC）第12巻 第1号～第13巻 第2号：2024年6月～2025年12月 (招待論文、資料論文、ショートペーパーを含む) のなかから優れたもの2編以内
推薦資格	本学会正会員、学生会員および名誉会員
推薦方法	下欄の推薦用紙に記入の上、郵送、FAX くださいかまたは必要事項を記載の上 Eメールでお送りください。 (FAX：03-5615-2894, Eメール：hensyu@iiej.org)
締切日	2026年1月26日（月）
表彰規定等	論文賞表彰規定参照（次ページ）
その他	推薦された論文（招待論文、資料論文、ショートペーパーを含む）を基に選定して第55回通常総会もしくは年次大会で行う予定です。表彰は賞牌。

-----きりとり-----

論文賞候補論文推薦用紙

受付番号		
論文・資料題名		
著者名		
掲載番号	巻　号（通巻　号）*	巻　号（通巻　号）*
推薦理由		
推薦者	氏名	会員番号
	住所	

*英文論文誌の場合、通巻番号のご記入は不要です。

論文賞表彰規定

第1条(目的)

論文賞は、本会定款第2章第5条による表彰で、本会発行の会誌および英文論文誌に発表された論文(招待論文、資料論文、ショートペーパーを含む、以下同じ)のうち、とくに優秀なもの2編以内を最優秀論文賞として選び、その著者に贈呈する。

第2条(対象)

表彰は隔年とし、原則として前々年および前年発行の会誌に掲載された論文を対象とする。

第3条(選定)

論文賞の選定は、別途定める「論文賞授賞候補選定手続規定」に従い、選定委員会で行われた評価結果に基づき、上位の論文2編以内を最優秀論文授賞候補論文として、理事会で決定するものとする。

ただし、第1条および本条前記の規定に拘らず、理事会が必要と認めた場合は、上記の定数を超えて選出し、決定することができる。なお、最優秀論文以外の論文の中から優秀論文を選出することができる。ただし、優秀論文の総数は第2条における全表彰対象論文数の5%を超えないものとし、最優秀論文賞が2編を超えた場合はそれに応じて減らすものとし、2編未満の場合はそれに応じて増やすことができる。

第4条(表彰)

最優秀論文賞は賞牌とし、優秀論文賞は表彰状とし、通常総会(隔年)で表彰する。著者が共著の場合には著者全員を表彰し、また同一著者に重ねて授賞しても差し支えない。なお、表彰時点においても著者のうち少なくとも1名は会員(正会員、学生会員および名誉会員)であることを条件とする。

論文賞授賞候補選定手続規定

1. 選定委員会の編成

会長は、下記の構成により委員長、幹事、委員を委嘱し、選定委員会を発足させる。

委員長	編集委員長
副委員長	副編集委員長
幹 事	編集理事、企画理事、総務理事
委 員	編集委員、企画委員

2. 委員長は副委員長・幹事と協議し、会誌の発行状況により対象とする会誌の範囲、候補推薦および授賞候補選出の日程を決める。

3. 候補推薦用紙の配布

学会事務局は候補推薦用紙を作成し、会誌とじ込みで会員に配布する。なお、推薦資格は正会員、学生会員および名誉会員とし、推薦は2編以内、記名式とする。候補の推薦は会誌とじ込み用紙以外でも受け付ける。

4. 推荐論文一覧表の作成

幹事は候補推薦締切日以後ただちに推薦論文一覧表を作成し、委員長に報告する。選定委員会は、投稿時の査読評価結果等、選定委員会で定める基準を満たす論文を推薦論文一覧表に加えることができる。

5. 授賞候補選定手続き

- 委員長は授賞候補選出のため、推薦論文一覧表を添えて選定委員会委員に締切日までの投票を依頼する。なお、投票資格は委員長・副委員長・幹事・委員とし、投票編数は2編以内、記名式とする。得票数を評価得点とする。
- 上記a. の規定に拘らず、委員長は選定委員会の承認を得て、選定委員会の構成委員の中から論文評価委員(10名以上)を選定し、締切日までに評価点の提出を委嘱し、その評価得点を選定の基準とすることができる。

6. 授賞候補選出評価結果の集計

幹事は、授賞候補選出評価提出締切日以後ただちに評価得点を集計し、順位一覧表を作成して委員長に報告する。

7. 評価上位の資格審査

委員長は副委員長・幹事を招集し、評価順位一覧表の上位論文について授賞候補としての資格審査を行う。

8. 授賞候補の選定

委員長は選定委員会を開催し、授賞候補選出評価結果および上位論文の資格審査結果を報告し、最優秀論文授賞候補2編以内を選定し、理事会に答申する。ただし、選定委員会が必要と認めた場合は、本定数を超えて候補論文を選出し、理事会に答申することができる。また、必要に応じ最優秀論文候補論文以外の論文の中から規定数以内の優秀論文候補論文を選出し、理事会に答申する。

論文賞候補論文推薦のお願い

来年度は第22回の論文賞表彰を行いますので、下記の要領で授賞候補論文をご推薦頂きたく、お願ひいたします。

推薦対象と推薦数	学会誌第53巻 第1号（通巻267号）～第54巻 第4号（通巻274号）：2024年1月～2025年10月 英文論文誌（T-IEVC）第12巻 第1号～第13巻 第2号：2024年6月～2025年12月 (招待論文、資料論文、ショートペーパーを含む) のなかから優れたもの2編以内
推薦資格	本学会正会員、学生会員および名誉会員
推薦方法	下欄の推薦用紙に記入の上、郵送、FAX くださいかまたは必要事項を記載の上 Eメールでお送りください。 (FAX : 03-5615-2894, Eメール : hensyu@iiej.org)
締切日	2026年1月26日（月）
表彰規定等	論文賞表彰規定参照（次ページ）
その他	推薦された論文（招待論文、資料論文、ショートペーパーを含む）を基に選定して第55回通常総会もしくは年次大会で行う予定です。表彰は賞牌。

-----きりとり-----

論文賞候補論文推薦用紙

受付番号		
論文・資料題名		
著者名		
掲載番号	巻　号（通巻　号）*	巻　号（通巻　号）*
推薦理由		
推薦者	氏名	会員番号
	住所	

*英文論文誌の場合、通巻番号のご記入は不要です。

西田賞表彰規定

平成 18 年 3 月 17 日制定 平成 19 年 11 月 2 日改定

第 1 条 (目的)

西田賞は、本会定款第 2 章第 5 条による表彰で、本会発行の会誌および英文論文誌に発表されたビジュアルコンピューティング関連の論文（招待論文、資料、ショートペーパーを含む、以下同じ）のうち、とくに優秀なもの 1 編以内を選び、その第一著者に贈呈する。

第 2 条 (対象)

表彰は隔年とし、原則として前々年および前年発行の会誌に掲載されたビジュアルコンピューティング関連の論文を対象とする。

第 3 条 (選定)

西田賞の選定は、別途定める「西田賞授賞候補選定手続規定」に従って、会員（正会員、学生会員および名誉会員、以下同じ）推薦による推薦論文を対象に選定委員会で投票を行い、得票上位の論文 1 編以内を授賞候補論文として選定し、理事会で決定するものとする。

ただし、第 1 条および本条前記の規定に拘らず、理事会が必要と認めた場合は、上記の定数を超えて選出し、決定することができる。

第 4 条 (表彰)

西田賞は賞牌とし、通常総会（隔年）で表彰する。著者が共著の場合には第一著者を表彰する。なお、第一著者は会員であること。

西田賞授賞候補選定手続規定

1. 選定委員会の編成

会長は、下記の構成により委員長、副委員長、幹事、委員を委嘱し、選定委員会を発足させる。

委員長 VC 委員長

副委員長 VC 副委員長

幹事 編集理事および VC 委員より 2 名

委員 編集理事および VC 委員より 10 名程度、

2. 選定対象と日程

委員長は幹事と協議し、会誌の発行状況により対象とする会誌の範囲、候補推薦および授賞候補選出の日程を決める。

3. 候補推薦用紙の作成

幹事は候補推薦用紙を作成し、会員に提供する。なお、推薦資格は正会員、学生会員および名誉会員、推薦は 2 編以内、記名式とする。

4. 推薦論文一覧表の作成

幹事は候補推薦締切日以後ただちに推薦論文一覧表を作成し、委員長に報告する。

5. 授賞候補選出投票用紙の配布

委員長は授賞候補選出のための投票用紙を作成し、推薦論文一覧表とともに選定委員会委員に配布する。なお、投票資格は委員長、幹事および委員、投票は表彰予定編数以内、記名式とする。

6. 授賞候補選出投票結果の集計

幹事は、授賞候補選出投票締切日以後ただちに投票結果を集計し、得票順位一覧表を作成して委員長に報告する。

7. 得票上位の資格審査

委員長は幹事を招集し、得票順位一覧表の得票上位について授賞候補としての資格審査を行う。

8. 授賞候補の選定

委員長は選定委員会を開催し、授賞候補選出投票結果および得票上位の資格審査結果を報告し、授賞候補 1 編以内を選定、理事会に報告する。ただし、選定委員会が必要と認めた場合は、本定数を超えて候補論文を選出し、理事会に報告することができる。

アレキサンダー・ベイン賞候補推薦募集

2025年10月1日
一般社団法人画像電子学会
会長 高村 誠之

本学会では、画像工学の学術の進展に対して卓越した業績のあった会員、または産業界の発展に特別の功労がありその功績が顕著であった会員へのアレキサンダー・ベイン賞推薦候補を募集します。

別紙の候補者推薦書にご記入の上、2026年2月13日（金）必着で学会事務局までにメール添付で送付ください（推薦書の電子ファイルは上記学会ホームページ（<http://www.iieej.org/>）からダウンロードできます）。

アレキサンダー・ベイン賞規程（抜粋）

第1条 本会定款第4条に基づく画像工学に関する学術に関し卓越した業績のあった者、または産業界や本学会関連事業に関し特別の功績があった者に対し、本規程による表彰を行う。

第7条 本賞は、10年を超えて本学会会員である者を受賞対象とし、過去に本賞を受賞していない者のうちから、原則として毎年若干名以内を選定し贈呈する。

第8条 各年度に適切な該当者がいない場合は、該当者なしとする。

第9条 本賞として、賞状および記念メダルを贈呈する。

アレキサンダー・ベイン賞選定手続き規程（抜粋）

第2章 選定委員会選定細則

第5条 アレキサンダー・ベイン賞の一般推薦の推薦状フォーム並びに推薦締め切り期日については期日前にフェロー会員に周知する。

2. 推薦状にはフェロー会員2名の推薦を必要とする。
3. 推荐状フォームは本規程別紙に掲げるものを使用する

[贈呈式]

2026年の総会もしくは年次大会で行う予定です。

上記、アレキサンダー・ベイン賞規程等の詳細は当学会ホームページ（<https://www.iieej.org/admission/arexande/>）を参照してください。

以上

別紙

アレキサンダー・ベイン賞 候補者推薦書

受賞候補者名	氏名 会員番号, 在籍年数所属, 住所, 電話番号, メールアドレス
受賞候補者経歴	学歴, 職歴 :
	本学会での活動歴 :
	学術的業績, 産業的貢献, 社会的貢献 :
推薦理由 (サイテーション)	
主たる功績 (いずれか, または複数に○印) (1) 学術的業績 (2) 産業的貢献 (3) 社会的貢献 (4) 学会活動	
推薦理由	
受賞候補者の推薦者 氏名 (フェロー認定年)	(1) () (2) ()

画像電子技術賞候補の推薦のお願い

画像電子学会では、画像電子に関する極めて優れた製品、システム、デバイスを開発した個人またはグループを毎年若干件選出して画像電子技術賞として表彰します。つきましては、本技術賞に相応しいと思われる候補（個人もしくはグループ）を下記要領に従って、推薦下さるようお願い致します。なお、選定は画像電子技術賞選定委員会で行います。

記

- ・推薦者の資格：本学会正会員であること（一人1件に限る）。
- ・候補者の資格：表彰時において、本学会会員であること。
- ・推薦方法：次頁の推薦用紙またはこれをコピーしたものに、
 - (1) 推薦する個人もしくはグループ全員の氏名、所属（連絡先）
 - (2) 推薦する製品名、システム名、デバイス名
 - (3) 推薦理由
 - (4) 推薦者の氏名、所属、住所、電話／FAX番号、e-mailを記入の上、学会あてFAX、郵便またはe-mailでお送り下さい。
尚、推薦理由を裏付ける資料があれば、その案内（論文の場合であれば、題目、発表機関、VOL. NOなど）を推薦理由欄に付記して下さい。
- ・推薦の締切：2026年2月13日（金）
- ・送付先：〒116-0002 東京都荒川区荒川三丁目35番4 ライオンズマンション三河島第二 101号
画像電子学会〈TEL〉03-5615-2893 〈FAX〉03-5615-2894 〈E-mail〉hyoujun@iieej.org
- ・表彰内容：楯及び表彰状を贈呈します。
- ・表彰方法：通常総会もしくは年次大会の席で表彰するとともに、学会誌に解説を掲載します。
- ・技術展示：受賞技術は、2026年の年次大会にて技術展示をお願いします。

・画像電子技術賞授賞リスト（最近の例）

受賞年度	受賞技術名もしくは製品・システム名	受賞者所属先
2023年	波長依存PSFメタレンズを用いた圧縮スペクトルイメージング <曾我部 陽光>他 日本電信電話株式会社 コンピュータ&データサイエンス研究所 先端集積デバイス研究所	
2021年	3次元データ空間の歪み検出・補正およびスケール付与システム	<青木 勝彦(株式会社AB. do) 他>
2020年	非エピポーラ光伝搬の計測と解析に基づく皮下血管のリアルタイムイメージング	<久保尋之(東海大学) 他>
2019年	非接触式血中酸素飽和度測定装置	<長尾嘉満(早稲田大学)>
2018年	羽虫の群れの動き生成システム (2件) 展示会見学体験向上を目的とするユニバーサルオブジェクト認識技術を用いたMICEアプリの提供	<北海道大学大学院情報科学研究科> <NTTサービスエボリューション研究所>
2017年	アクティブ照明と多視点カメラ入力による実時間インテグラル立体表示 (2件) 視覚の知覚メカニズムを活用した視点移動対応裸眼3D映像スクリーン技術	<名古屋大学大学院工学研究科/日本放送協会> <日本電信電話株式会社/東北大学>
2016年	24時間連続稼動全天球ライブストリーミングカメラ RICOH R Development Kit	<㈱リコー 技術経営センター>

画像電子技術賞表彰規定

2015年9月4日改訂

第1条（目的）

画像電子技術賞は、画像電子に関する極めて顕著な新しい技術、製品、システムを開発した個人またはグループを毎年若干件選出して表彰するものである。

第2条（選定）

画像電子技術賞は、別途定める「画像電子技術賞候補選定手続規定」に従って候補を選出し、理事会で決定するものとする。但し、過去に受賞した個人またはグループは候補から除く。

第3条（表彰）

画像電子技術賞は、楯および表彰状とし、毎年通常総会もしくは年次大会で表彰するとともに、学会誌上で紹介する。なお、年次大会にて技術展示を依頼する。

画像電子技術賞候補推薦用紙

<技術・製品または、システム名>

<受賞候補者> (複数の場合は全員ご記入ください)

氏名	所属	TEL/FAX/ e-mail

<推薦者>

氏名 :

所属 :

TEL :

FAX :

以下の各項目にご記入ください。

・画像電子分野との関連性

・新規性

・有効性

・販売、採用などの実績

・参考となる資料

2025年度フェロー候補推薦募集

2025年10月1日

一般社団法人画像電子学会

会長 高村 誠之

本学会では、学術上の業績、学会活動の活性化、教育・社会活動への取り組み、標準化活動などにおいて、特に貢献のあった会員に対しフェローの称号を授与する制度を設けています。フェロー称号認定につきましては以下の通り実施致しますので、フェロー候補の推薦をお願いします。なお、本情報は学会ホームページからも参照できます。

[推薦募集要領]

別紙のフェロー候補推薦書にご記入の上、2026年2月13日（金）必着で学会事務局までにメール添付で送付ください（推薦書の電子ファイルは学会ホームページからダウンロードできます）。選定委員会で審査の上、理事会で決定されます。

なお、条件、資格等はフェロー制度規程[pdf] 学会ホームページに記載されていますので参照して下さい。また、候補者1名に対し推薦者は2名必要ですが、その内少なくとも一人は候補者と同一の機関に属されない方といたします。

[称号授与]

フェロー称号授与式は2026年の総会もしくは年次大会で行う予定です。

以上

画像電子学会フェロー候補推薦書

フェロー候補者	氏名 会員番号, 在籍年数 所属, 住所, 電話番号, メールアドレス
候補者略歴	学歴, 職歴 :
	本学会での活動歴 :
	業績 ; (特に, 本学会分野での業績)
功績内容 (サイテーション) (22文字以内)	
主たる功績 (いずれか, または複数に○印) (1) 工学的・科学的先駆者 (2) 学会活動推進者 (3) 技術開発指導者 (4) 教育者 (5) 標準化・社会活動	
推薦理由	
フェロー候補の推薦者 氏名 (会員番号)	(1) () (2) () (印)

(注) 記入スペースが不足する場合はそのまま行数を増やして書いてください。複数ページでも結構です。

代議員候補推薦のお願い

一般社団法人 画像電子学会
代議員選挙管理委員長

画像電子学会では、2026年度の代議員改選を行います。
下記の要領で代議員のご推薦をお願いします。

1) 代議員とは

毎年1回6月に開催される総会に出席し、予算、決算、役員、事業計画など学会の重要事項につき審議する役割の人です。以前の総会には正会員なら誰でも出席し審議に参加出来たのですが、代議員制では正会員及び名誉会員を代表する形で代議員が総会に出席することになります。

総会は、学会の最高議決機関ですのでそれに正会員及び名誉会員を代表して出席する重要な役割を担うことになります。

2) 代議員の人数と任期は

30人ぐらいで、任期は2年で（2026年選出の方は、2026.6.総会日～2028.6.総会前日），
2期程度とします。

3) 選出する方法は

立候補及び学会の正会員、名誉会員などからの推薦により候補を定め、正会員、名誉会員の選挙によって選出します。

4) どのような人が代議員になれるのか

代議員は正会員、名誉会員から選出されます。但し役員（理事、監事）に就いている人は代議員になれません。

5) 推薦決定及び選挙方法は

ご推薦頂いた方を代議員選挙管理委員会にて資格審査し信任方法で選挙を行います。

学会の発展のためにお尽力頂ける意欲的な方をご推薦下さい。
勿論自薦でもかまいません。よろしくお願いします。

- ・推薦及び送付方法：添付の推薦書に必要事項を記入しメール又はFAXで
事務局 大嶽宛にお送り下さい。
- ・送り先：FAX；03-5615-2894 E-mail；hyoujun@iiej.org
- ・締め切り日：2026.2.13(金)
- ・推薦の場合は、被推薦者の了解を得ておいてください。（非会員の場合は推薦後正会員
にご入会頂きます）

氏名	
所属・役職	
住所	
TEL・FAX	
e-mail	

推薦者

＜参考＞ 代議員選挙規程（必要な方は、事務局へお申し込み下さい。メールでお送りします）

目 次

解 説

インクジェットによる前処理液印刷システムを搭載したガーメントプリンタ 江藤大貴, 松木佑典, 青木勇太, 平野政徳 318(2)

Imaging Today

「医療を創る3Dプリンティング:バイオ造形の現在地」
 Introduction 中村一希, 山口大地, 朝武 敦 323(7)
 高強度フルカラー樹脂造形が可能な3Dプリンター 内藤寛之 324(8)
 積層造形医療機器の研究開発動向 岡崎義光 336(20)
 剣山式バイオ3Dプリンタ:再生医療の最前線 横本翔平, 吉里 広, 俞 俊杰, 村田大紀, 中山功一 348(32)
 3D-Bioprintingと3Dバイオイメージング:1研究者の研究の歩みから 中村真人 357(41)

Imaging Highlight

画像認識技術のコモディティ化と新たな可能性 新井啓之 365(49)

教育講座

画像技術を支える高分子の基礎 (IX) —ゴムの製造 (混合工程) — 近藤寛朗 369(53)

研究室訪問

石井研究室 (無機物質化学研究室) 早稲田大学 先進理工学部化学・生命科学科 379(63)

2024年度日本画像学会表彰

一般社団法人 日本画像学会第68回定期総会資料 383(67)

会報

会報 446(130)

会告

会告 449(133)

投稿案内

日本写真学会誌の目次 450(134)

日本印刷学会誌の目次

日本印刷学会誌の目次 452(136)

画像電子学会誌の目次

画像電子学会誌の目次 453(137)

Journal of Imaging Science and Technologyの目次

Journal of Imaging Science and Technologyの目次 454(138)

画像閑話

令和七年編集委員

編集委員長 宮本栄一 (就任キュメントリューションズ)

編集幹事 石塚一輝 (コニカミノルタ)

編集副委員長 名越応昇 (三菱製紙)

編集副幹事 中村一希 (千葉大学)

山口大地 (リコー)

編集委員

新井啓之 (日本工業大学) 次田将大 (東海大学) 名越応昇 (三菱製紙)

石塚一輝 (コニカミノルタ) 常安翔太 (東京工芸大学) 前田秀一 (東海大学)

岩田基 (大阪府立大学) 椿頼尚 (シャープ) 宮本栄一 (就任キュメントリューションズ)

梅津信二郎 (早稲田大学) 朝武敦 (コニカミノルタ) 村上和歌子 (リコー)

加藤知之 (東芝テック) 内藤裕義 (大阪公立大学) 山口大地 (リコー)

岸由美子 (リコー) 中村一希 (千葉大学) 山崎弘 (元コニカミノルタ)

齋藤将史 (就任キュメントリューションズ) 中山信行 (東京工芸大学) 横山優樹 (社団法人ビジネスイベーション)

目 次

論 文

アンチモンドープ酸化スズからなる不可視インクと背景色の組み合わせによる見えないデジタル情報 兵藤 哲, 船渡結香, 前田秀一...458(2)
 カラー・コード通信のための誤り訂正機能と色閾値逐次生成処理の実装 古屋隼人, 常田妃登美, 滝本和哉, 曽根宏靖...465(9)

Imaging Today

「アクセシビリティ向上のための情報処理技術」

Introduction 岩田 基, 中山信行, 岸由美子, 村上和歌子...471(15)
 自助具3Dモデル・パラメトリックサービスの開発と展望 林 園子, 濱中直樹...472(16)
 アクセシブルなスポーツ環境の創出に向けて—視覚障害者との協働によるキックボクシング支援技術の開発と社会実装 筒井彩華...477(21)
 生成AIを活用した触図のデザイン支援システム 田中賢吾...486(30)
 触地図自動作成システムの開発とその活用 渡辺哲也...492(36)
 視覚障害者の創作活動を支援する多感覚インターフェースの設計と実装 松尾政輝, 平 海依, 大西淳児, 坂尻正次, 三浦貴大...496(40)
 視覚障害者・晴眼者の視覚情報のとらえ方の違いについて 大西淳児, 松尾政輝, 坂尻正次...502(46)
 エイプリズムとテクノエイプリズム 小林 茂...510(54)

Imaging Highlight

化学とバイオの連携が具体化するリグニンからの芳香族ポリマー原料生産 園木和典, 磯部和也, 吉川琢也, 樋口雄大, 竹内大介, 吉田暁弘, 上村直史, 政井英司...514(58)

教育講座

画像技術を支える高分子の基礎(X)—ゴムの製造(配合工程) 近藤寛朗...521(65)

研究室訪問

因幡研究室 東京科学大学 環境・社会理工学院 融合理工学系 エンジニアリングデザインコース 537(81)

会報

会告 541(85)

投稿案内

日本写真学会誌の目次 549(93)

日本印刷学会誌の目次

..... 551(95)

画像電子学会誌の目次

..... 552(96)

Journal of Imaging Science and Technologyの目次

..... 553(97)

画像閑話

令和七年編集委員

編集委員長 宮本栄一(就任キュメントリューションズ)

編集幹事 石塚一輝(コニカミノルタ)

編集副委員長 名越応昇(三菱製紙)

編集副幹事 中村一希(千葉大学)

山口大地(リコー)

編集委員

新井啓之(日本工業大学) 次田将大(東海大学) 名越応昇(三菱製紙)

石塚一輝(コニカミノルタ) 常安翔太(東京工芸大学) 前田秀一(東海大学)

岩田基(大阪公立大学) 椿頼尚(シャープ) 宮本栄一(就任キュメントリューションズ)

梅津信二郎(早稲田大学) 朝武敦(コニカミノルタ) 村上和歌子(リコー)

加藤知之(東芝テック) 内藤裕義(大阪公立大学) 山口大地(リコー)

岸由美子(リコー) 中村一希(千葉大学) 山崎弘(元コニカミノルタ)

齋藤将史(就任キュメントリューションズ) 中山信行(東京工芸大学) 横山優樹(社団法人ビジネスイベーション)

口絵・口絵解説

177

「画像からくり」

第70回 「ステレオビューア」あるいは「実体鏡」: 訳語はいろいろ

桑山 哲郎

179

会告 日本印刷学会誌・日本画像学会誌・IIEEJ Transactions on Image Electronics and Visual Computing

185

日本写真学会 2025年度 学会賞受賞者

191

特集 2024年の写真の進歩

特集 2024年のカメラ

234

解説 レンズ駆動用次世代アクチュエータ『デュアルフェイズリニアモータ』の開発

藤中 広康

239

解説 SIGMA 28-105 mm F2.8 DG DN | Art の開発

梅田 武

243

解説 マルチスペクトルとコンピュテーションナルフォトグラフィによる撮影ソリューションの開発

宮内 裕司, 左部 校之, 横山 恵太郎

247

2025年度(一社)日本写真学会年次大会 講演要旨

309

一般社団法人日本写真学会 第14回 定時社員総会

323

会報 理事会抄録, 入会のおすすめ

目次

第62巻 第4号 (2025年8月)

■ 卷頭言

研究発表会に見る印刷学研究の動向 矢口博之 169

■ 総説 特集「プリンテッドエレクトロニクスの現状」

印刷法でつくるデジタルスキンデバイスの基礎と応用 関根智仁 170

溶液プロセスを用いたトップゲート有機トランジスタと不揮発性メモリ応用 永瀬 隆 175

超薄型ペロブスカイト太陽電池の高効率化に向けた新展開 甚野裕明 180

フレキシブル有機フォトディオードの生体センシング応用 横田知之 185

液体金属電極を用いた伸縮可能なディスプレイの開発 宮川幹司・中田 充 190

■ 印象記

2025年前期 日本印刷学会西部支部 見学会 三浦芳裕 194

グラビア研究会 第11回グラビア基礎講座に参加して 梶田暁登 195

■ Abstract

■ 資料

■ 学会だより

■ 日本印刷学会賛助会員名簿

日本印刷学会誌編集委員

編集委員長 矢口博之 (東京電機大学)

委 員 東 吉彦 (東京工芸大学)

杉山 徹 (大日本印刷 (株)) 小泉真一 (共同印刷 (株))

光本知由 (富士フィルム (株))

前田満穂 ((独) 国立印刷局)

矢島久夫 (東洋インキ (株))

伊藤 学 (TOPPAN ホールディングス (株))

次田将大 (東海大学)

大場久恵 (東京電機大学) 常安翔太 (東京工芸大学)

幹 事 小関健一

表紙デザイン 益田宏樹

目次

第62巻 第5号 (2025年10月)

■ 巻頭言

印刷の標準化と委員会活動 佐藤利文 217

■ 総説 特集「標準化の最新動向」

ISO 22388 の概要と活用 山越 学 218

色評価環境標準化の動向

～色評価用 LED 照明を用いた印刷物観察条件のガイドラインと ISO 3664 の改定～

..... 杉山 徹 222

Japan Color 認証制度の最新動向 竹本文人 227

グレーキャリブレーション手法「G7+™」の開発と技術的革新 曹 于鉉 232

■ 印象記

2025 年度スクリーン印刷技術研究会セミナー

「スクリーン印刷基礎講座『入門・基本編』」 江連真市 237

2025 年日本印刷学会夏期セミナー「時代ごとの魅せる印刷技術」 伊藤竜男 238

■ Abstract

■ 学会だより

日本印刷学会誌編集委員

編集委員長 矢口博之 (東京電機大学)

委 員 東 吉彦 (東京工芸大学)

杉山 徹 (大日本印刷 (株)) 小泉真一 (共同印刷 (株))

光本知由 (富士フィルム (株))

前田満穂 ((独) 国立印刷局)

矢島久夫 (東洋インキ (株))

伊藤 学 (TOPPAN ホールディングス (株))

次田将大 (東海大学)

大場久恵 (東京電機大学) 常安翔太 (東京工芸大学)

幹 事 小関健一

表紙デザイン 益田宏樹

会 報

○新入会員紹介（2025年9月30日）

正会員
宇津 圭祐（東海大学）

学生会員
石戸大智（JAXA 宇宙科学研究所）
小林 慶杜（早稲田大学）
江場 一真（愛知工業大学）
常 舜志（芝浦工業大学）
大場 輝空（愛知工業大学）
中尾 光大（佐賀大学）
松尾 陽矢（福岡工業大学）

○会員現況

名譽会員	18名
正会員	435名
学生会員	46名
賛助会員	18社 21口
特殊会員	25件

編集後記

令和7年10月号をお届けします。本号は、年に一度コンピュータビジョン、コンピュータグラフィックス、及び関連の画像処理に関する論文を特集するビジュアルコンピューティング（VC）特集号の31回目で、「cGANによる中空オブジェクトの脆性破壊形状生成」、「PolySlerp: 球面多角線形補間」、「写真を入力とする2次元アバター用衣装制作支援」、「Frame-Break: アナモルフォーシスを用いた裸眼立体映像の立体感の強化」、「物体識別を目的とした物体のインタラクション領域の取得手法」と、多彩な研究成果5編を掲載しました。また、対象技術や応募時期も近い映像表現・芸術科学フォーラム論文特集も今号に併せて掲載しており「メッシュのスペクトル処理を用いた位置ベースダイナミクスの高速化」を収録しています。さらに、一般論文では「筆跡のゆらぎに潜む筆者個性を活用した模倣筆跡の検出」を掲載しているほか、山本奏 副会長による随想「リアルを超えて心に寄り添う画像メディアの未来」、拓殖大学 藤堂研究室のグループ紹介等、興味深い記事もお届けしています。是非ご一読下さい。

また、当学会最大の年次行事で、本年は8月25日から27日まで埼玉大学にて開催されました第53回年次大会の実施報告、及びその中で挙行されたアレキサンダー・ベイン賞の授賞式報告も本号に掲載しています。年次大会は今後多くの方々が参加しやすい、大学の夏休み時期に開催を予定しております。来年度の年次大会もぜひご期待ください。

次に、本学会 ビジュアルコンピューティング研究会・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研究会・映像情報メディア学会 映像表現&コンピュータグラフィックス研究会が共催し、VC分野における国内最大級の研究交流の場といえる Visual Computing 2025 が令和7年9月7日から10日に早稲田大学にて今年も盛大に開催されました。この場を借りてご報告すると共に、ご参加いただいた方々、ご支援いただいた皆様に厚く御礼申し上げます。

さて、ほぼ2年ごとに実施しております国際学会 IEVC2026 は来年3月に広島開催で着々と準備を進めています。前回の編集後記でも少し触ましたが、IEEEのCTSocとのSister Society契約に基づき本ProceedingsがIEEEのExplorerに初めて掲載されることとなりました。LBPについてはまだ投稿も間に合いますので国内で発表できる国際学会として是非この機会をご活用くださいますようお願い申し上げます。

生成AIをはじめとする人工知能技術の急速な進展により、画像関連の分野も大きな変革期を迎えてます。このような時代の潮流の中で、本学会は学術研究の発展と技術交流の促進に引き続き貢献を図るべく、今後も様々な企画の実現に尽力してまいります。会員の皆様には、そのような活動の推進や行事へのご参加を通じて、なお一層当学会へのご支援・ご協力を賜りますよう、心よりお願い申し上げます。

（ゲスト編集幹事 石川 知一 記）

Journal of the IIEEJ 2025
2025 Vol.54 No.4

画像電子学会誌

第54卷 第4号 (通巻274号)
令和7年10月30日発行 (年4回発行)
©2025 画像電子学会
E-mail: hensyu@iiej.org
http://www.iiej.org/

発行所 一般社団法人 画像電子学会
〒116-0002 東京都荒川区荒川3-35-4 ライオンズマンション三河島第二 101号
TEL (03) 5615-2893 FAX (03) 5615-2894 (振替 00180-3-166232)
編集・発行者 内田 理

