

3次元対象へのプロジェクションマッピングにおける 画質劣化抑制技術

岩井大輔

大阪大学 大学院基礎工学研究科

プロジェクタは、元来、2次元の白色平面である投影スクリーンに映像投影する目的で最適設計されている。このため、実空間の3次元対象に映像重畳するプロジェクションマッピングでは、映像の色ずれ・位置ずれ・焦点ぼけ・相互反射・影といった種々の画質劣化が生じる。本講演では、我々の研究グループが進めてきた、画像処理および光学的アプローチで画質劣化を抑制する技術について紹介する。

1. はじめに

実空間の3次元対象に映像重畳するプロジェクションマッピングは、頭部搭載型ディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) やスマートフォン等のディスプレイを装着・把持する必要なしに、肉眼で拡張現実感 (AR: Augmented Reality) を体験できる。実空間にテキストや画像データを重畳して付加情報を提示できるだけでなく、実物の質感を切り替えたり、その形状や動きを変調するような表現も可能である。我々は、従来主流であったエンターテインメント[1]以外の応用先として、工業製品の内装デザイン支援[2]、テレプレゼンス支援[3]、身体拡張インタフェース[4,5]、もの探し支援[6,7,8]等、様々な分野への応用に関する知見を蓄積してきている。

プロジェクタは、元来、2次元の白色平面スクリーンに映像投影する目的で最適設計されている。一方、プロジェクションマッピングの投影対象は非平面かつ模様がついている場合が多く、映像の色ずれ、位置ずれ、焦点ぼけ、影による映像の欠け、といった種々の画質劣化が生じてしまう。我々は、このような技術的制約を、画像処理および光学的に解決し、画質劣化を抑制する研究を進めてきた。本稿では、これら我々のグループによる成果を中心に紹介する。なお、紙幅の制約上割愛したより広範な技術の紹介については、当該領域の研究をまとめた以下のサーベイ論文を参照いただきたい[9,10]。

2. 色ずれ

模様のある対象に映像投影すると、その模様が投影コンテンツに混ざり込み、色ずれが生じる。模様とは、表面の反射特性が空間的に変化している状態を指す。このため、表面上の各点の反射特性に応じて投影画素の色を調整することで、投影結果における模様による色ずれの影響を抑える事が可能になる。色ずれを補償する技術では、投影画素毎に色の調整量を求めるため、カメラを用いたプロジェクタカメラ系 (ProCams:

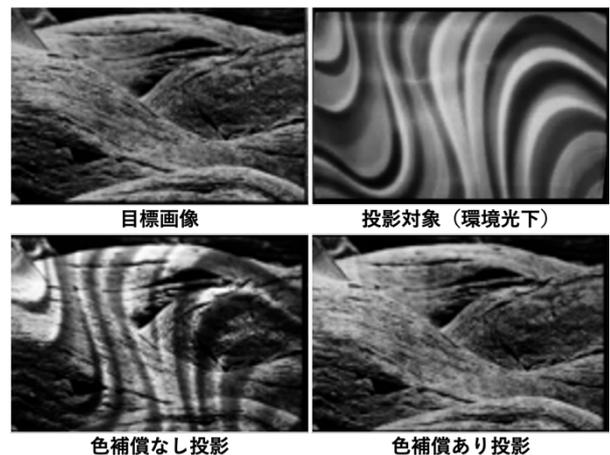


図 1: 色補償[12]

Projector-Camera system) が採用されてきている。

古典的な色補償手法[11]は、線形の色変換モデルをベースとしている。対象上のある点を照らす投影画素の RGB 値を $p = [r_p \ g_p \ b_p]^t$ 、観測される RGB 値を $c = [r_c \ g_c \ b_c]^t$ とすると、この色変換モデルはこれらの関係を $c = Mp + e$ と表す。ここで M は投影 RGB 値から観測 RGB 値への変換をあらわす 3 行 3 列の行列であり、 e は、環境光下でのその点の RGB 値である。今、観測したい目標 RGB 値を c' とすると、その色を再現するために投影すべき RGB 値は、上式を変形して $p' = M^{-1}(c' - e)$ で算出できる。一方、この手法は、プロジェクタおよびカメラのいずれも、その入出力特性が線形でなければ正しく動作しない。カメラは、そのデバイス設定で線形化が容易であるが、プロジェクタの線形化は、実際に様々な RGB 値を入力したときの出力色を計測する必要がある。しかしながら、プロジェクタの色空間は複雑で、単純に各チャンネルのみを変化させ (例えば、 $[0 \ 0 \ 0]$ から $[255 \ 0 \ 0]$ まで R 値を増加させる) て計測した出力色を使うだけでは、正確に線形化できないことが知られている。

そこで我々は、明示的にプロジェクタの入出力特性

を線形化するのではなく、投影 RGB 値と観測 RGB 値を、直接、非線形関数を用いて関係付ける手法を提案している[12] (図1)。具体的には、RGB 空間を均等分割 (例: $5 \times 5 \times 5$) し、分割頂点の各 RGB 値をプロジェクタに入力し、投影対象上でその投影結果を観測する。分割頂点すべての投影 RGB 値に対応する観測 RGB 値が得られたら、他の投影 RGB 値に対応する観測 RGB 値を、Thin-Plate Spline 関数で補間することで求める。この関係を用いることで、目標観測 RGB 値を再現するための投影 RGB 値を求める。最近では、深層ニューラルネットワークを用いることで、非線形の色空間の対応をより精度良く求める手法も提案されており[13]、模様のある投影対象上で、所望の目標画像を色ずれなく表示することが可能となってきている。

3. 位置ずれ

プロジェクションマッピングにより 3 次元の投影対象を所望の模様の色付けするためには、投影映像を対象に位置合わせする必要がある (図2)。典型的なプロジェクションマッピングでは、投影対象の形状を予め取得しておき、3D コンピュータグラフィクス (CG: Computer Graphics) ソフトウェアを用いてその形状モデルに着色をし、CG 空間に配置した仮想カメラから撮影して投影映像を作成する。このとき、仮想カメラと形状モデルとの位置関係が、実空間でのプロジェクタと投影対象との位置関係と一致すれば、位置ずれなく映像投影できる。このため、プロジェクションマッピングにおける位置ずれを解決するには、投影対象の位置姿勢を求めればよい。そのための古典的な方法としては、再帰性反射マーカを貼付してモーションキャプチャシステムを用いたり、QR コードのような AR マーカを貼付して単一カメラを用いて撮影し、その位置姿勢を推定する方法が挙げられる。一方、貼り付けたマーカが投影結果を阻害するという問題がある。

そこで我々は、投影対象に貼り付けた AR マーカを、上述の色補償技術を用いて視覚的にキャンセルする枠組みを提案している[14] (図3)。また、人の目に目立たないマーカとして、赤外線を発するマーカを投影対象に埋め込む技術も開発している[15] (図4)。この研究では、透明な素材を出力可能なマルチマテリアル 3D プリンタを用いて、投影対象内に光ファイバを埋め込み、投影対象底面に設置した赤外線 LED からの光を表面に導通させることで赤外線マーカを投影対象上に多数配置することを可能にした。

一方、テキスト情報を投影表示することを考慮すると、別の問題が生じる。たとえきちんと投影対象に映像を位置合わせ出来たとしても、非平面に投影されたテキストは、見る角度によって歪んでしまい、可読性が著しく低下してしまう可能性がある。そこで我々は、

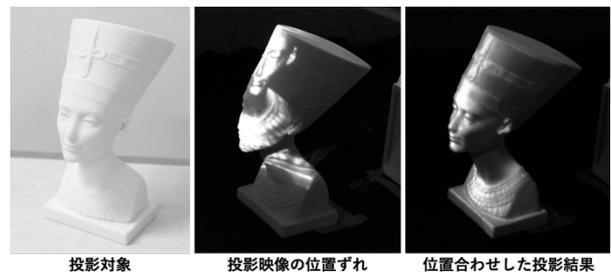


図2: 投影映像の位置合わせ

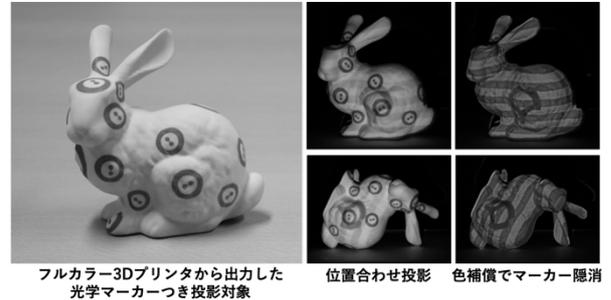


図3: マーカの視覚的キャンセル[14]

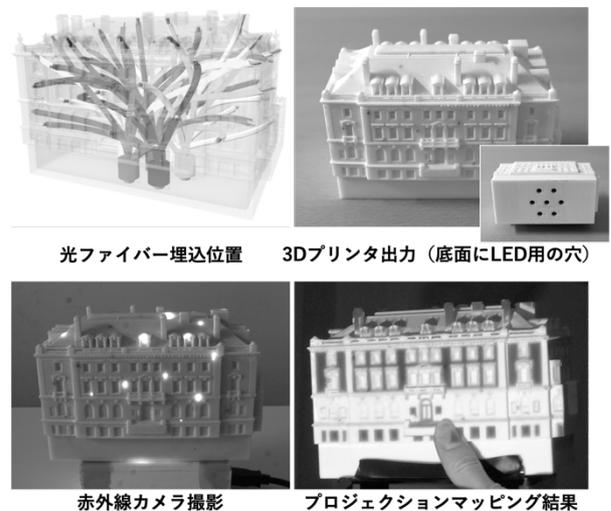
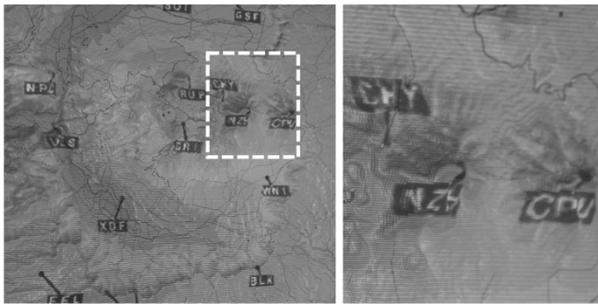


図4: 投影対象への光ファイバ埋込による赤外線マーカ[15]

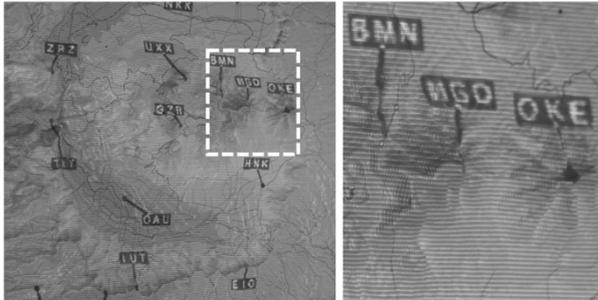
様々な歪ませたテキストの可読性を被験者実験によって調査し、その結果を用いて投影面上でテキストを配置すべき最適な場所を探索して見つけ出す技術を開発している[16] (図5)。

4. 焦点ぼけ

プロジェクタは、投影輝度を向上させるため開口が広く設計されている。このため、被写界深度が狭く、立体物や移動対象に映像投影する際は、焦点ぼけの影響が無視できない。焦点ぼけによる画質劣化を抑制するため、異なる距離に合焦するように設置した複数台のプロジェクタを用い、投影対象上の各点について最も焦点ぼけの影響の少ないプロジェクタから映像投影する技術が提案されている[17,18]。



テキスト位置最適化前



テキスト位置最適化後

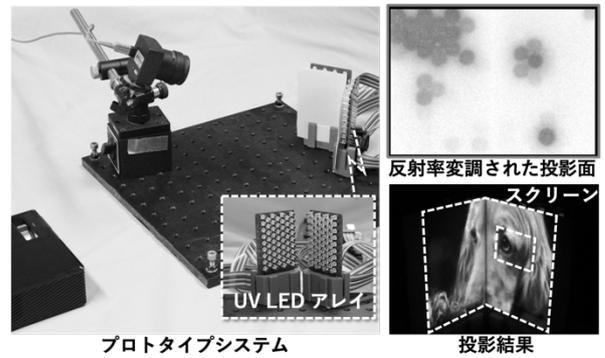
図 5: 投影テキストの最適配置[16]



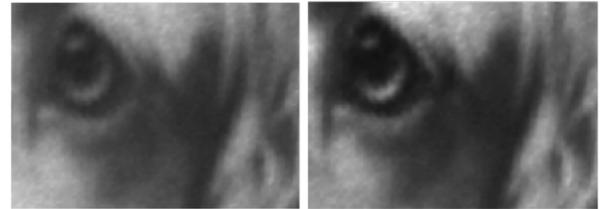
図 6: 焦点スイープ投影による焦点ぼけ補償[21]

一方、複数台の 프로젝터를用いる場合は、コストの増大、および、設置後の幾何学的・測色的較正処理の煩雑さが実装段階において問題となる。そこで、1台の 프로젝터를用いる場合でも、投影画像を予め補正することで焦点ぼけの影響を抑える技術が提案されている。具体的には、対象上の各点で1画素を投影したときのぼけ具合をインパルス応答（以降、PSF: Point Spread Function）として捉え、投影結果を、投影画像とPSFとの畳込み演算でモデル化する。これにより、目標画像とPSFの逆畳込み演算により求めた補償画像を投影することで、投影結果の焦点ぼけの影響を抑えることができる[19]。一方、この技術では、 프로젝터と投影対象との距離が変わるとPSFも変化するため、逐次その計測が必要となる。すなわち、投影対象が動くケースには適さない。そこで我々は、深層学習を用いて明示的なPSF計測を必要とせずに、焦点ぼけ補償画像をEnd-to-Endで計算する手法を提案している[20]。

さらに、合焦距離を高速に変調可能な焦点可変レン



プロトタイプシステム



通常投影

相互反射補償あり

図 7: 反射率変調を用いた相互反射補償[23]

ズを 프로젝터に取り付ける光学的なアプローチでこの問題を解決する方法も提案している[21] (図6)。この研究では、人の眼で知覚できない60 Hzで合焦距離を前後にスイープすることで、 프로젝터からの距離に依存せずPSFが一定となることを利用し、投影対象が動く場合でも、焦点ぼけの影響を抑制できることを示した。

5. 相互反射・表面下散乱

凹面への投影では、向かい合う2面の間で投影光が相互に反射し合うことで、投影結果が意図せず明るくなりコントラストが低下してしまう(相互反射)。また、人の皮膚や大理石をはじめとする多くの実物体では、入射した光が表面下に散乱して入射点とは異なる位置から出射する(表面下散乱)。これにより、投影結果の高周波成分が失われ、コントラストが低下してしまう。実はこれらの問題も、焦点ぼけ問題に対する補償画像計算手法を適用することができる。すなわち、相互反射、表面下散乱ともに、1画素を投影したときのPSFを計測し、目標画像とPSFの逆畳込み演算によって算出した映像を投影することで、これらの影響を抑制することが可能である[22]。

相互反射については、対象面の反射率を時空間的に変調することで、その影響をさらに抑制する手法を提案している[23]。具体的には、紫外線照射により発色するフォトクロミック材料を投影面に塗布し、紫外線LEDアレイを用いて空間的に面の反射率を変調することを実現した。相互反射の現象を数学的に表現するラジオシティ法の逆問題を解くことで、相互反射の影響を抑える最適な投影画像および反射率マップを求めるアルゴリズムを構築し、実験によりその効果を確認している(図7)。

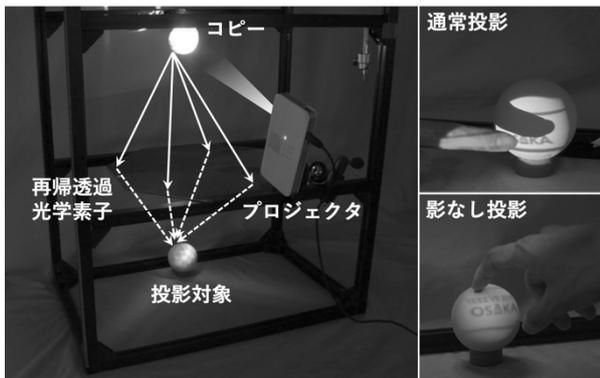


図 8: 再帰透過光学素子を用いた影除去[28]

6. 影・遮蔽

上述の画質劣化抑制技術が機能し、所望の見えを実対象上で再現できたとしても、対象とプロジェクタとの間に観察者などが入り込んでしまうと、投影光が遮蔽され影が生じるため、対象上の投影結果は消失する。この問題を解決するために、複数台のプロジェクタから重なり合うように対象に映像投影し、一部のプロジェクタが遮蔽されても投影結果が完全に消失しないようにする技術が提案されている[24,25]。これらの技術では、各プロジェクタのどの領域が遮蔽されているのかを正確に認識する必要があり、投影結果を解析したり、遮蔽物の形状・位置を計測する必要がある。一方、我々は、このような処理を必要とせず、カメラで撮影された投影結果を目標画像に近づけるよう、フィードバック系により効率的に投影画像を求める手法を提案している[26,27]。

また、光学的に影除去することで、上記のような計測処理を不要とするアプローチも提案している[28]。この研究では、空中像表示のために開発されている再帰透過光学素子を用いている。投影対象と鏡面对称な形状の白色物体（コピーと呼ぶ）を準備し、投影対象とコピーを光学素子に対して鏡像の位置に配置する。この配置では、コピーから発せられる光が、再帰透過光学素子を通った後、投影対象上の鏡面对称な点に集光することになる。これによって、コピーの見えをプロジェクションマッピングで切り替えることで、投影対象の見えを切り替えることができる。さらに、大型の再帰透過光学素子を用いれば、多方向からの投影が可能となるため、一部が遮られても投影対象上で影が発生しなくなる（図 8）。

7. おわりに

本稿では、3次元対象にプロジェクションマッピングする際に画質劣化を引き起こす、色ずれ・位置ずれ・焦点ぼけ・相互反射・表面下散乱・影・遮蔽といった各種の技術的課題を、画像処理および光学的に解決する技術を紹介した。一方、これらの問題を解決し、所望の見えを投影対象上で再現できたとしても、プロジ

ェクションマッピングにおける根本的問題が残っている。すなわち、プロジェクションマッピングではプロジェクタ以外に光源のない暗室が想定されている、という技術的制約である。我々は現在、より自然に現実空間を拡張するプロジェクションマッピングを実現すべく、この問題を解決するための技術開発を進めている。

参考文献

- [1] M. R. Mine, J. van Baar, A. Grundhoefer, D. Rose, and B. Yang. Projection-based augmented reality in disney theme parks. *Computer*, 45(7):32–40, 2012.
- [2] T. Takezawa, D. Iwai, K. Sato, T. Hara, Y. Takeda, and K. Murase. Material surface reproduction and perceptual deformation with projection mapping for car interior design. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 251–258, 2019.
- [3] D. Iwai, R. Matsukage, S. Aoyama, T. Kikukawa, and K. Sato. Geometrically consistent projection-based tabletop sharing for remote collaboration. *IEEE Access*, 6:6293–6302, 2018.
- [4] Y. Ueda, Y. Asai, R. Enomoto, K. Wang, D. Iwai, and K. Sato. Body cyberization by spatial augmented reality for reaching unreachable world. In *Proc. 8th Augmented Human Int. Conf.*, pp. 19:1–19:9, 2017.
- [5] H. Xu, D. Iwai, S. Hiura, and K. Sato. User Interface by Virtual Shadow Projection. In *Proc. SICE-ICCAS, SA14-1, A0897*, 2006.
- [6] K. Matsushita, D. Iwai, and K. Sato. Interactive bookshelf surface for in situ book searching and storing support. In *Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference*, 2011.
- [7] D. Iwai and K. Sato. Document search support by making physical documents transparent in projection-based mixed reality. *Virtual Reality*, 15(2):147–160, Jun 2011.
- [8] Y. Kitajima, D. Iwai, and K. Sato. Simultaneous Projection and Positioning of Laser Projector Pixels. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23(11):2419–2429, Nov 2017.
- [9] O. Bimber, D. Iwai, G. Wetzstein and A. Grundhöfer. The Visual Computing of Projector-Camera Systems. *Computer Graphics Forum*, 27(8): 2219–2245, 2008.
- [10] A. Grundhoefer and D. Iwai. Recent advances in projection mapping algorithms, hardware and

- applications. *Computer Graphics Forum*, 37(2):653–675, 2018.
- [11] T. Yoshida, C. Horii, and K. Sato. A Virtual Color Reconstruction System for Real Heritage with Light Projection. In *Proc. International Conference on Visual System and MultiMedia (VSMM)*, pp.161-168, 2003.
- [12] A. Grundhöfer and D. Iwai. Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Compensation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 24(12):5086-5099, 2015.
- [13] B. Huang and H. Ling. DeProCams: Simultaneous Relighting, Compensation and Shape Reconstruction for Projector-Camera Systems. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(5):2725-2735, 2021.
- [14] H. Asayama, D. Iwai, and K. Sato. Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(2):1091-1102, 2018.
- [15] D. Tone, D. Iwai, S. Hiura, and K. Sato. FibAR: Embedding Optical Fibers in 3D Printed Objects for Active Markers in Dynamic Projection Mapping. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(5):2030-2040, 2020.
- [16] D. Iwai, T. Yabiki, and K. Sato. View Management of Projected Labels on Non-Planar and Textured Surfaces. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(8):1415-1424, 2013.
- [17] O. Bimber and A. Emmerling. Multifocal projection: a multiprojector technique for increasing focal depth. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(4):658-667, 2006.
- [18] M. Nagase, D. Iwai, and K. Sato. Dynamic Defocus and Occlusion Compensation of Projected Imagery by Model-Based Optimal Projector Selection in Multi-projection Environment. *Virtual Reality*, 15(2):119-132, 2011.
- [19] L. Zhang and S. K. Nayar. Projection Defocus Analysis for Scene Capture and Image Display. In *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 907–915, 2006.
- [20] Y. Kageyama, M. Isogawa, D. Iwai, and K. Sato. ProDebNet: Projector Deblurring using a Convolutional Neural Network. *Optics Express*, 28(14):20391-20403, 2020.
- [21] D. Iwai, S. Mihara, and K. Sato. Extended Depth-of-Field Projector by Fast Focal Sweep Projection. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(4):462-470, 2015.
- [22] A. Bermano, P. Brüsweiler, A. Grundhöfer, D. Iwai, B. Bickel, and M. Gross. Augmenting Physical Avatars Using Projector Based Illumination. *ACM Transactions on Graphics*, 32(6), Article 189, 10 pages, 2013.
- [23] S. Takeda, D. Iwai, and K. Sato. Inter-reflection Compensation of Immersive Projection Display by Spatio-Temporal Screen Reflectance Modulation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(4):1424-1431, 2016.
- [24] C. Jaynes, S. Webb, and R. Steele. Camera-based detection and removal of shadows from interactive multiprojector displays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(3):290–301, 2004.
- [25] D. Iwai, M. Nagase, and K. Sato. Shadow Removal of Projected Imagery by Occluder Shape Measurement in a Multiple Overlapping Projection System. *Virtual Reality*, 18(4):245-254, 2014.
- [26] J. Tsukamoto, D. Iwai, and K. Kashima. Radiometric Compensation for Cooperative Distributed Multi-Projection System through 2-DOF Distributed Control. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(11):1221-1229, 2015.
- [27] J. Tsukamoto, D. Iwai, and K. Kashima. Distributed Optimization Framework for Shadow Removal in Multi-Projection Systems. *Computer Graphics Forum*, 36(8):369-379, 2017.
- [28] K. Hiratani, D. Iwai, P. Punpongsanon, and K. Sato. Shadowless Projector: Suppressing Shadows in Projection Mapping with Micro Mirror Array Plate. In *Proc. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR)*, pp. 1309-1310, 2019.