

令和元年6月5日現在

機関番号：14603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K16027

研究課題名(和文)画像解析に基づく表面下散乱の数値モデル化に関する研究

研究課題名(英文)An analysis of subsurface scattering effect from image acquisition

研究代表者

久保 尋之(KUBO, Hiroyuki)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教

研究者番号：90613951

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、従来は表面下散乱現象の複雑さから解析が難しかった半透明物体に対して、コンピュータビジョンによる画像を用いた被写体の幾何形状と散乱パラメータの取得技術の実現を目的とする。本研究を通じて、私たちは、半透明物体を対象として被写体の陰影情報から法線情報を推定する新たな陰影解析手法を提案した。さらに、液体のような散乱の性質にも着目し、散乱現象の方向依存性を表す位相関数の計測を実現した。また、これらの知見をもとに、寄与最大経路から表面下散乱光を計算することで、もっともらしいレンダリング結果をリアルタイムに得ることができる手法を新たに提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

私たちの身の回りには光を散乱する素材で溢れており、プラスチックや多くの液体、私たち自身の肌などがそれにあたる。従来のコンピュータビジョンの研究では、不透明な物体の位置や形状などの情報が推定可能であるが、このような光を散乱する素材に対しては適用できなかった。本研究では、このような問題を解決し、ありふれた存在である半透明物体を例えばマシンビジョンによって機械が正しく理解することが可能となり、機械・ロボットが我々の日常により緊密に溶け込むことが可能となる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we realized that the acquisition of geometric and scattering parameter of the translucent object from acquired images by the computer vision technique. Through this research, we proposed a new shading analysis method to estimate surface normal information. Furthermore, we realized the measurement method of the phase function that represents the appearance. Moreover, we proposed a novel method that can synthesize realistic appearance of translucent materials in real-time by considering a single shortest optical paths.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：コンピュータビジョン コンピュータグラフィクス コンピュータショナルフォトグラフィ 表面下散乱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンピュータビジョンの研究領域では、ある照明環境下でシーンに含まれる物体の形状や法線情報などを取得する手法が数多く提案されており、直接反射光のみを考慮する手法が古くから提案されている。一方で、私たちの身の回りにありふれた存在である人の肌や石鹸、口ソックなどのような半透明物体と呼ばれる材質のものでは、物体の表面に入射した光線が内部で散乱を繰り返す表面下散乱現象が生じるため、半透明物体の幾何形状や散乱パラメータを推定することは難しかった。

2. 研究の目的

本研究では、従来は表面下散乱現象の複雑さから解析が難しかった半透明物体に対して、コンピュータビジョンによる画像を用いた被写体の幾何形状と散乱パラメータの取得技術の実現を目的とする。そのために、表面下散乱現象をよく計測するための光学系を設計して実際に散乱パラメータし、それにもとづいて被写体の幾何情報の推定を実現する。さらに、これらの情報をもとにリアルな質感を表すコンピュータグラフィックス映像の生成を可能とすることが目的である。

3. 研究の方法

- (1) これまでに私たちは、本来大域的な情報を必要とする表面下散乱現象を近似的に表現する手法を提案していた。そこで本研究課題では、この局所照明モデルを応用し、複数の照明条件下における物体の陰影情報から被写体の法線情報を推定する新たな陰影解析手法を提案した。本手法では物体の曲率に着目し、表面下散乱現象を局所照明モデルとして扱うことで、半透明物体における法線情報を推定することが可能である。まず、ランバート面を仮定して得られた法線情報を用いて、物体の曲率を計算する。つぎに、表面下散乱現象を考慮した曲率に依存する反射関数を用いて法線の再計算を行う。以上により、半透明物体に対する法線方向の推定を可能とした。
- (2) さらに、私たちは液体のような散乱の性質にも着目し、散乱現象の方向依存性を表す位相関数の計測を実現した。本手法では、ワインやジュースなどのような比較的濃度が薄く、単一散乱が仮定できる散乱媒体を前提とすることで、光源としてナロービームを入射したときの観測を数理モデル化し、実際の観測から計算によって非パラメトリックな位相関数を取得することを可能とした。
- (3) また、私たちは表面下散乱現象の観測や計測を重ねるにつれて、人の肌や大理石などのいわゆる多重散乱光が支配的となる材質では、表面下散乱光の寄与は光路が長くなるにつれて急激に小さくなり、コンピュータグラフィックスで画像を生成するときには、半透明物体内部を最短の光学的距離で透過した光ほどレンダリング結果に対して視覚的により重要であることに気がついた。そこで入射光の強度および光学的最短距離の2つを考慮し、最も明るさの寄与が大きくなる表面下散乱光ただ1つを用いて物体表面上の輝度を推定する。本稿ではこれを寄与最大経路と呼び、この経路ただ1つを用いて物体表面上の輝度を推定する。本手法は、寄与最大経路を通った表面下散乱光は視覚的に大きな重要度を持つという経験則に基づく手法である。このような寄与最大経路1つから表面下散乱光を計算することで、物理的な正しさは保証されないものの、もっともらしいレンダリング結果をリアルタイムに得ることができる。特に、物体内部を考慮した光路の計算コストは非常に高いが、本手法では考慮する経路の本数を限定したことにより、内部に異なる材質の半透明物体が含まれた物体を実時間にレンダリング可能とした。

4. 研究成果

被写体として使用する物体を図1(a)に示す。ランバート反射を仮定した照度差ステレオ法を用いて求めた法線の初期推定値を(b)に示し、初期法線をもとに計算した曲率を(c)に示す。取得した曲率の値をもとに法線の推定を行うと、(d)に示すような推定法線が得られた。また、従来手法を適用した結果を(e)に示し、初期法線からの変化量を(f)に示す。明るい領域ほど、法線が大きく修正されたことを示している。本手法を適用した結果、表面下散乱の影響を受けやすい曲率の大きい領域を中心に、既存手法に比べて画像上のより多くの領域において法線が更新されたことが伺える。

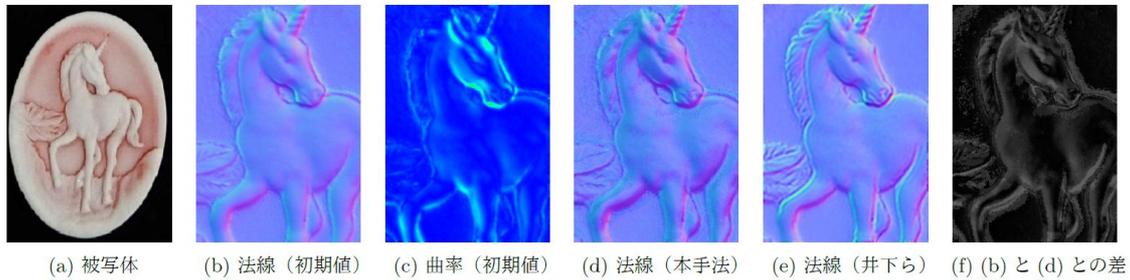


図 1 半透明物体（プラスチック製品）の法線推定結果

さらに、実際の液体（白ワイン）から散乱位相関数を計測し、画像をレンダリングしたときの結果を図 2 に示す。測定環境として、計測対象の液体で満たした水槽に鉛直上方向から光源を照射し、拡散板を通して散乱の様子を下方向からカメラで計測する(a)。このとき得られた画像(b)の輝度値が計測対象における散乱位相関数の動径積分と一致するため、これを微分したものが求める散乱位相関数(c)となる。得られた位相関数を用いて散乱現象をシミュレーションし、コンピュータグラフィックス画像としてレンダリングした結果を(d)に示す。計測対象の散乱現象における特性がもっともらしく再現されていることがわかる。

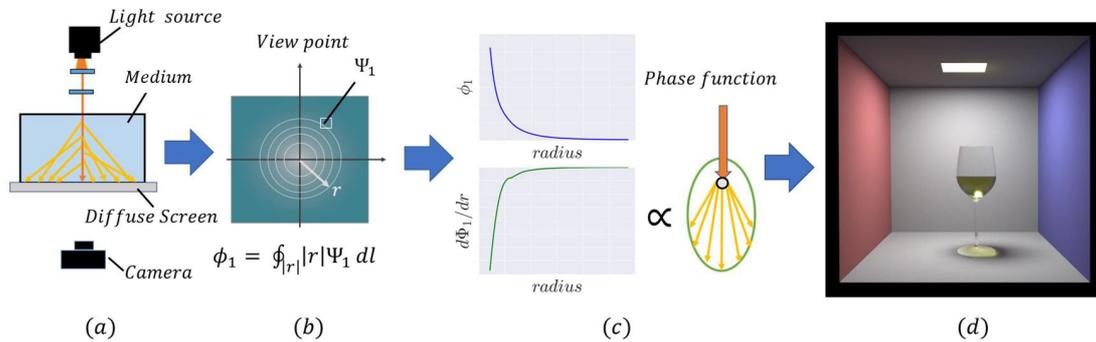


図 2 散乱位相関数の計測システムと計測結果

また、図 3 光学的最短経路長に基づく手法で様々な形状・材質をコンピュータグラフィックスで描画した結果である。図に示すとおり、仏像の手(a)やウサギの耳(c)、ドラゴンの角や尾(b)などの薄い部分での一般的な半透明物体に見られるような光の透過が観察できる。また、(c)、(e)に見られるように、不均一の半透明物体に対しても、自然なレンダリング結果が得られている。例えば、図 5(c) に示した Bunny の胴体部分では黒色の不均一材質からの色の染み出しが観察できる。これらのレンダリングに要する処理時間は、リアルタイムレンダリングに必要とされる 33 ms よりも大幅に短く、実用面を考慮しても十分に高速な描画が実現されたとと言える。

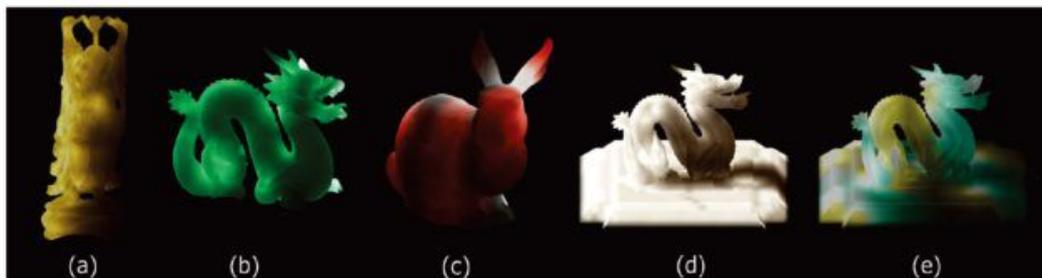


図 3 光学的最短経路長に基づく手法で様々な形状・材質を描画した結果

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

1. T. Iwaguchi, T. Funatomi, T. Aoto, H. Kubo, Y. Mukaigawa, Optical Tomography based on Shortest-path Model for Diffuse Surface Object, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2018.11., doi:10.1186/s41074-018-0051-x, 査読有
2. K. Tanaka, Y. Mukaigawa, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, Material Classification from Time-of-Flight Distortions, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI), 2018., doi:10.1109/TPAMI.2018.2869885, 査読有
3. Y. Minetomo, H. Kubo, T. Funatomi, M. Shinya, Y. Mukaigawa, Acquiring Non-parametric Scattering Phase Function from a Single Image, Computational Visual Media, 2018.8., doi:10.1007/s41095-018-0122-z, 査読有
4. 小澤禎裕, 谷田川達也, 久保尋之, 森島繁生, 光学的最短経路長を用いた表面下散乱の高速計算による半透明物体のリアルタイム・レンダリング, 画像電子学会論文誌, Vol.46, No.4, 533-546, 2017.10., https://www.jstage.jst.go.jp/article/iieej/46/4/46_533/_article/-char/ja, 査読有
5. K. Tanaka, Y. Mukaigawa, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, Recovering Inner Slices of Layered Translucent Objects by Multi-frequency Illumination, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.39, No.4, pp.746-757, 2017.4, doi:10.1109/TPAMI.2016.2631625, 査読有
6. T. Iwaguchi, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Mukaigawa, Light Path Alignment for Computed Tomography of Scattering Material, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol8, No.1, 2016.8., doi:10.1186/s41074-016-0003-2, 査読有
7. 浅田繁伸, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, 書画の質感再現を目的とした反射率と透過率を同時に再現するレプリカの作成, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J99-D, No.8, pp.747-756, 2016.8., https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieicejournal/22/3/22_12/_article/-char/ja/, 査読有

〔学会発表〕(計 44 件)

1. T. Iwaguchi, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, S. Narasimhan, Acquiring Short Range 4D Light Transport with Synchronized Projector Camera System, Proc. ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST) 2018, Posters.
2. 上田朝己, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, プロジェクタカメラシステムの同期遅延と走査速度の制御にもとづく光伝播の計測と応用, 情処研報 CVIM 214-17, 2018.11.
3. 久保尋之, S. Jayasuriya, 岩口堯史, 船富卓哉, 向川康博, S. Narasimhan, Plane-to-Ray ライトトランスポートの計測に基づく半透明物体内部のリアルタイムイメージング, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2018) Extended Abstract, 2018.8.
4. 久保尋之, S. Jayasuriya, 岩口堯史, 船富卓哉, 向川康博, S. Narasimhan, エピポーラ幾何に基づく Plane-to-Ray ライトトランスポートの計測と解析, Proc. Visual Computing シンポジウム 2018, 2018.6.
5. H. Kubo, S. Jayasuriya, T. Iwaguchi, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, S. Narasimhan, Acquiring and Characterizing Plane-to-Ray Indirect Light Transport, In Proc. IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP) 2018, 2018.5.
6. 西川雅清, 國吉房貴, 船富卓哉, 田中賢一郎, 久保尋之, 澤田好秀, 加藤弓子, 向川康博, コンタクトイメージングにおける光線の演算を用いた細胞観察, 第 3 回 PoTS 映像学シンポジウム, 2018.3.
7. H. Kubo, S. Jayasuriya, T. Iwaguchi, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, S. G. Narasimhan, Parametric Light Transport Acquisition and its Application to Medical Imaging, 2nd International Symposium of the Research Project on Global Research Network for Healthy Society based on Collaboration Between Media Informatics and Sports Science, 2018.2.
8. K. Tanaka, Y. Mukaigawa, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, Material Classification Using Frequency- and Depth-dependent Time-of-Flight Distortion, Proc. The 12th International Workshop on Robust Computer Vision (IWRCV), 04-1, pp.44, 2018.1.
9. Y. Minetomo, H. Kubo, T. Funatomi, M. Shinya, Y. Mukaigawa, Acquiring Non-parametric Scattering Phase Function from a Single Image, Proc. The 12th International Workshop on Robust Computer Vision (IWRCV), P-24, pp.39, 2018.1.
10. Y. Minetomo, H. Kubo, T. Funatomi, M. Shinya, Y. Mukaigawa, Acquiring Non-parametric

- Scattering Phase Function from a Single Image, In SIGGRAPH Asia 2017 Technical Brief, 2017.11.
11. 櫛田貴弘, 船富卓哉, 久保尋之, 向川康博, 散乱を利用した物体反射特性推定における観測の散乱異方性を考慮したモデル化, 情処研報 CVIM 209-26, 2017.11.
 12. 西川雅清, 船富卓哉, 田中賢一郎, 久保尋之, 澤田好秀, 加藤弓子, 向川康博, コンタクトイメージングにおける細胞による屈折変位量の可視化, 情処研報 CVIM 209-17, 2017.11.
 13. K. Tsubota, T. Takatani, T. Aoto, K. Tanaka, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, Examining Single Scattering Region in Concentration, Depth, and Wavelength on Diluted Media, OSJ - OSA Joint Symposia, 30aOD5, 2017.10.
 14. K. Kitano, T. Okamoto, K. Tanaka, T. Aoto, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, Recovering Temporal PSF using ToF Camera with Delayed Light Emission, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2017), 2017.8.
 15. T. Kajihara, T. Funatomi, H. Makishima, T. Aoto, H. Kubo, S. Yamada, Y. Mukaigawa, Non-rigid registration of serial section images by blending 2D rigid transformations, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2017), 2017.8.
 16. K. Tanaka, Y. Mukaigawa, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, Material Classification using Frequency and Depth Dependent Time-of-Flight Distortion, Proc. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.79-88, 2017.7.
 17. X. Zeng, T. Iwaguchi, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, Estimating Parameters of Subsurface Scattering using Directional Dipole Model, Proc. NICOGRAPH International 2017, 2017.6.
 18. X. Zeng, T. Iwaguchi, H. Kubo, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, Evaluating Inverse Rendering of Subsurface Scattering using Translucent Spherical Object, 情処研報 CGVI 166-3, 2017.3.
 19. 伏下晋, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, 光学特性の異なる液体の混合による半透明物体の散乱特性再現, 映情学技報, vol. 41, no. 12, AIT2017-56, pp. 45-48, 2017.3.
 20. 國吉房貴, 船富卓哉, 久保尋之, 澤田好秀, 加藤弓子, 向川康博, コンタクトイメージングにおける視認性向上のためのリフォーカシングと高周波照明法の統合, 情処研報 CVIM 206-11, 2017.3.
 21. K. Tanaka, Y. Mukaigawa, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, Recovering Transparent Shape from Time-of-Flight Distortion, The 11th International Workshop on Robust Computer Vision (IWRCV), 2016.12.
 22. 伏下晋, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, 半透明物体の散乱特性再現を目的とした液体の混合比率推定, 画像関連学会連合会 第3回秋季合同大会, 2016.11.
 23. 岩口優也, 田中賢一郎, 青砥隆仁, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, ToF カメラの距離計測歪みを手掛かりとした半透明物体の分類, 情処研報 CVIM 203-12, 2016.9.
 24. 加藤弓子, 澤田好秀, 佐藤太一, 國吉房貴, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, 多光源撮影による初期胚のリフォーカシングと3D表示, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2016), 2016.8.
 25. 櫛田貴弘, 船富卓哉, 久保尋之, 向川康博, 実測に基づいた散乱位相関数モデルの検証, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2016), 2016.8.
 26. 國吉房貴, 船富卓哉, 久保尋之, 向川康博, 澤田好秀, 加藤弓子, コンタクトイメージングへの高周波照明法の適用, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2016), 2016.8.
 27. 櫻井俊, 青砥隆仁, 船富卓哉, 久保尋之, 向川康博, 糖度の可視化に向けた重要波長の選択方法, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2016), 2016.8.
 28. 持田恵佑, 久保尋之, 森島繁生, 不均一な半透明物体のリアルタイムレンダリング手法, Computer Entertainment Developers Conference (CEDEC) 2016, 2016.8.
 29. 小澤禎裕, 久保尋之, 森島繁生, ダイクストラ法を用いた最大寄与値の高速取得による半透明物体のリアルタイムレンダリング, Computer Entertainment Developers Conference (CEDEC) 2016, 2016.8.
 30. 持田恵佑, 久保尋之, 森島繁生, 不均一な半透明物体のリアルタイムレンダリング手法, Computer Entertainment Developers Conference (CEDEC) 2016, 2016.8.
 31. 小澤禎裕, 久保尋之, 森島繁生, ダイクストラ法を用いた最大寄与値の高速取得による半透明物体のリアルタイムレンダリング, Computer Entertainment Developers Conference (CEDEC) 2016, 2016.8.
 32. T. Iwaguchi, T. Funatomi, H. Kubo, Y. Mukaigawa, Light Path Alignment for Computed Tomography of Scattering Material, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2016), 2016.8.
 33. M. Okamoto, H. Kubo, Y. Mukaigawa, T. Ozawa, K. Mochida, S. Morishima, Acquiring Curvature-Dependent Reflectance Function from Translucent Material, Proc. NICOGRAPH International 2017, 2305a182.pdf, 2016.7.
 34. K. Tanaka, Y. Mukaigawa, H. Kubo, Y. Matsushita, Y. Yagi, Recovering Transparent

- Shape from Time-of-Flight Distortion, Proc. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 746-757, 2016. 6.
35. 浅田繁伸, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, カラーを考慮した書画の反射・透過率を同時再現するレプリカの作成, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2016, 2016.6.
 36. K. Mochida, M. Okamoto, H. Kubo, S. Morishima, Real-time Rendering of Heterogeneous Translucent Objects using Voxel Number Map, In. EG2016 - Posters, 2016.5.
 37. T. Ozawa, M. Okamoto, H. Kubo, S. Morishima, Real-Time Rendering of Heterogeneous Translucent Materials with Dynamic Programming, In. EG2016 - Posters, 2016.5.
 38. 持田恵佑, 岡本翠, 久保尋之, 森島繁生, 不均一な半透明物体の描画のための Translucent Shadow Maps の拡張, 情報処理学会 第 78 回全国大会 講演論文集, 2016.3.
 39. 加藤弓子, 澤田好秀, 國吉房貴, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, リフォーカシングによる初期胚の自由焦点画像生成, 信学技報 MI2015-102, vol. 115, no. 401, pp. 135-139, 2016.1.
 40. 岡本翠, 久保尋之, 向川康博, 森島繁生, 曲率に依存した反射関数を用いた半透明物体の照度差ステレオ法, Visual Computing ワークショップ 2015, 2015.11.
 41. 持田恵佑, 岡本翠, 小澤禎裕, 久保尋之, 森島繁生, 三次元状を考慮した半透明物体のリアルタイムレンダリング, 情処研報 CG 161-2, 2015.11.
 42. 小澤禎裕, 岡本翠, 久保尋之, 森島繁生, 動的計画法を用いた半透明物体のリアルタイムレンダリング, 情処研報 CG 161-1, 2015.11.
 43. 岡本翠, 久保尋之, 向川康博, 森島繁生, 曲率依存反射関数を用いた半透明物体における照度差ステレオ法の改善, 情処研報 CVIM 198-24, 2015.9.
 44. 浅田繁伸, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, 書画の質感再現を目的とした光学的レプリカの試作, 情処研報 CG 159-5, 2015.7.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

〔その他〕

特になし

6 . 研究組織

特になし

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