

金属切削面の外観予測のための 表面微細形状計測にもとづいたレンダリング

岸本 泰海¹ 久保 尋之² 高柳 亜紀³ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要：切削加工によって金属を加工する際には、単に形状が設計通りに出来ているかどうかだけでなく、その外観の審美的な定性評価を行うことがあり、そのためには様々な照明下での見え方を検討し、評価する必要がある。そこで本研究では、金属加工の定性評価においてデジタルツインの概念を導入した支援技術の実現に向け、切削面の外観予測を目的として、表面の微細な形状の計測にもとづいた CG レンダリングを試みる。本稿では、写実的なレンダリングのために計測した表面微細形状を直接用いる方法と、法線分布関数として近似する方法との比較について述べ、結果として、表面微細形状を直接用いてレンダリングするには、膨大な面積の計測が必要であることが分かった。さらに、法線分布関数として近似する方法では、切削面特有の縞模様を表現するために、適切な大きさの領域で法線分布関数を求める必要があることが分かった。

キーワード：金属加工, 表面微細形状, 法線分布関数, デジタルツイン

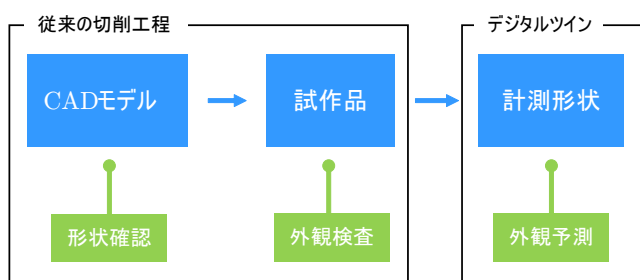


図 1 金属加工のフローと外観検査

1. はじめに

近年、現実世界の事象を仮想世界で再現するデジタルツインという概念を活用したものづくりが注目されている。これにより、現実世界では実現が困難である複数のシナリオを、仮想世界においてシミュレーションで評価することが期待されている。そのような作業のひとつである金属の切削加工では外観検査が必要であり、仕上げ面の縞模様や傷などが製品として許容できるかどうかについて人間による審美的な評価が行なわれる。

図 1 には、一般的な金属の切削工程における製品の見た目の検査の流れを示す。以降では、これら一連の流れを順を追って説明する。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² 東海大学

³ 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

切削工程

まず、CAD (computer-aided design) システムを利用して形状のモデリングを行い、切削によって制作する形状を決定する。本稿では、このようにモデリングされた形状を CAD モデルと呼ぶ。次に、CAD モデルをもとに加工プログラムを制作し、この加工プログラムを NC(Numerical Control) 加工機に入力することで実際に金属部品の切削工程が実行される。

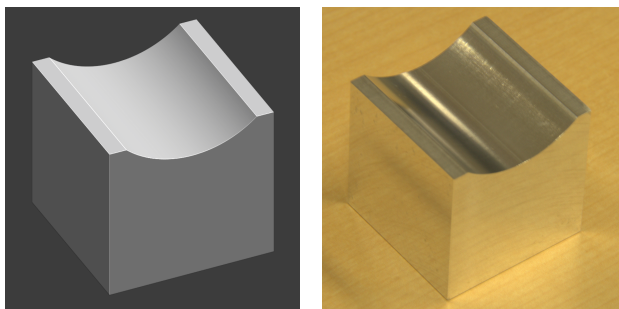
外観検査

切削工程によって作られた製造物は、加工の出来をチェックするための品質検査が行われる。このとき、製造物の巨視的な形状が CAD モデルと相違なく作られているかを検査するのはもちろんであるが、それだけでなく製造物の外観についても審美的な評価がなされることがある。切削加工の際の目標となる形状データとして与える CAD モデルは、あくまで巨視的な形状を定めているに過ぎず、切削工程によってもたらされる微視的な表面形状や法線の分布については定義されていない。切削の結果として生じた外観が製品として許容できるかが確かめるために、このような外観検査が行われる。実際、切削加工の際には製造物の表面に独特の模様などが生じることが知られており(図 2)、本稿では、不規則に発生する傷・ムラ・筋模様を加工不良、ブラシによる規則的なパターンを加工模様と呼ぶことにする。このような金属部品を対象とした外観検査では、実際

の制作物の表面の外観について熟練の検査員の目視によって評価が行われている。

切削加工される金属の表面の光学的な特性は、その多くで鏡面反射が支配的であり、光源環境によっては加工不良が見えにくくなったり、のっぺりとした見た目になったりするなど、加工面の見え方が大きく変化する。そのため、適切な光源環境下で検査を実施する必要があるが、必ずしも検査に適した光源環境を用意できるわけではない。

そこで本研究では切削加工により作られる製造物に対してデジタルツインの概念を導入し、コンピュータグラフィックスにより仮想的に外観検査に適した光源環境を用意し、レンダリングによって生成された画像に対して審美的な外観検査を行うことを目指す。そのために、実際に切削加工によって作られた製造物の微細形状を計測によって取得することで、それら微視的な要因を CAD モデルに反映させた写実的な CG 映像のレンダリング方法を提案する。



(a) CAD モデル (b) 切削後の外観
図 2 従来の外観に関する品質検査

2. 表面微細形状計測にもとづいたレンダリング

2.1 表面微細形状の直接レンダリング

コンピュータグラフィックスの分野では、現実世界の光の輸送を計算機で再現する物理ベースレンダリング [2] が利用されている。なかでも物体表面における反射特性は双方向反射率分布関数 (以後、BRDF) がしばしば用いられている。BRDF は反射面のある点における光源方向からの放射照度と視線方向への放射輝度の比として定義され、理想的に平らな金属の表面では、入射した光が正反射方向のみ反射する、完全な鏡面反射として扱うことができる。そこで本研究では、計測の分解能が切削加工によって生じる切削痕の幅に比べて十分に高いことを仮定し、計測によって得られたメッシュと法線ベクトルをそのまま使い、さらに反射特性として鏡面 BRDF を用いて CG 映像をレンダリングする。これにより、加工模様や加工不良の外観を予測できることが期待される。

レンダリングを実現するために、切削加工された金属表面の微細形状を、レーザ変位センサを用いて非接触で計測

する。実際に取得できるデータはあくまで点群であり、表面を形作るための点の接続情報は得られないため、ドローネー三角形分割法を用いて後処理としてメッシュを生成する。さらに、メッシュ上の各三角形パッチの頂点位置から法線方向を計算により求める。

2.2 法線分布関数を用いた近似によるレンダリング

前述した表面微細形状の直接レンダリングでは、製造物の全体の見た目を予測するために、加工面全域の微細形状を計測する必要がある。しかし、ワーク全域を計測するには膨大な時間がかかり、データ量も大きくなりがちである。一方で、切削加工による加工模様は、その原因にもよるが、物体の表面にある程度一様に広がっていることが観察から分かってきた。そこで、時間をかけて製造物の全体を計測する代わりに、最小限の時間で一部の表面だけを計測し、表面の統計的な物理量を使った外観の予測について検討する。

マイクロファセット理論にもとづく BRDF [1], [3], [8], [11] では、物体表面が小さな平面鏡面の集合と仮定し光の反射をモデル化している (図 3)。これは、表面の微小な凹凸は直接見るのが難しく、遠方から見ると単純化された平面に見えるという考えにもとづいている。物体表面の BRDF は、巨視的な法線 ω_n (以下マクロ法線と呼ぶ) と微視的な表面の法線 ω_m (以下マイクロ法線と呼ぶ) で表現できる。マイクロファセット理論では、入射光ベクトル ω_i ・反射光ベクトル ω_o に対する BRDF は次式のように示される。

$$f(\omega_i, \omega_o) = \frac{D(\omega_m)G(\omega_i, \omega_o)F(\omega_i, \omega_o)}{4|\omega_i \cdot \omega_n||\omega_o \cdot \omega_n|} \quad (1)$$

D は物体表面の法線分布関数、 G は自己遮蔽、 F はフレネル反射を表現する。要素の中でも法線分布関数は BRDF がもたらす外観に大きな影響を与える。法線分布関数とは、マイクロ法線 ω_m の分布である。法線分布関数は、図 4 のように、マクロ法線方向を z 軸方向とするマクロスケールでの接空間で表現できる。さらに、マイクロ法線は単位ベクトルであるため長さが 1 で正規化されていることから、図 4(b) に示すような接平面の 2 次元空間で表現することも可能である。同図は、分布の最も高い値を白色、最も低い値を黒色で表現している。

従来から、楕円体の形状を用いて法線分布関数をパラメトリックに表現する研究が行われてきた。Trowbridge と Reitz [9] により、等方性の法線分布関数が初めて提案された。その後、Walter らによって再び同じ分布が導出され、GGX と名付けられた [11]。また、異方性のある GGX [5], [10] も提案されており、任意の法線 $\mathbf{N} = (x_n, y_n, z_n)$ が与えられたとき、次式のように表現される。

$$D(\mathbf{N}) = \frac{1}{\pi \alpha_x \alpha_y (\frac{x_n^2}{\alpha_x^2} + \frac{y_n^2}{\alpha_y^2} + z_n^2)^2} \quad (2)$$

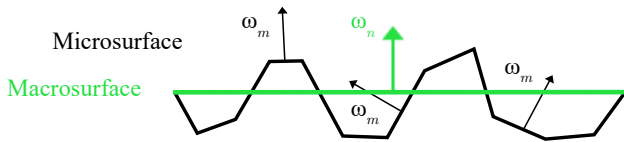


図3 マクロ表面とマイクロ表面の関係

α_x と α_y はそれぞれ x と y 方向の粗さの指標を表している。GGX はコンピュータグラフィックスの分野で広く使われている分布の一つである。しかし、異方性のある法線分布関数は少数のパラメータで表現できるのに対し、複数のピークに対応したモデルはパラメータが多くなってしまふ。

実物体からの反射特性の計測には、ゴニオリフレクトメータで得られた BRDF から推定する方法 [12] や物体に表面にレーザ光を当て、反射した光をアクリル板に投影する方法 [13] がある。また、Dong ら [4] は、計測された高さマップから法線分布関数を求め、外観予測に用いることができることを示した。法線分布関数は、メッシュの各三角形の法線と面積を計算することで求めることができる。高さマップに波長スケール以下の凹凸がない場合には、計測された法線分布関数をそのままマイクロファセット理論にもとづく BRDF に代入することができる。法線分布関数は次式を満たすよう正規化する必要がある。

$$\int_{\theta} D(\omega_m) |\omega_m \cdot \omega_n| d\omega_m = 1 \quad (3)$$

$d\omega_m$ は、マイクロ法線 ω_m を中心とした微小立体角である。この式は、微小面の面積と巨視的な平面の面積とを一致させるために、微小面を巨視的な平面に射影する必要があることを意味している。また、微小面を射影した面積の球積分の和が 1 になるよう正規化を行う必要がある。

得られた法線分布関数を用いて外観を予測するには、式 (1) を用いて BRDF を計算する必要がある。この時、 D 項に計算した法線分布関数を代入し、 G 項と F 項は 1 として計算を行う。BRDF を設定したシーンを計算するには、一般的にパストレーシング法 [6] が用いられる。パストレーシング法では、BRDF に従った方向に入射光を重点的にサンプリングすることで、結果の分散を低減することができる。これは重点的サンプリングと呼ばれる。ただし、本研究におけるレンダリングの対象はマイクロスケールでは完全な鏡面反射を仮定しており、マクロスケールにおける反射の分布は法線分布関数に依存する。そこで本実験では、法線分布関数にもとづき入射光の重点的サンプリングを行う。これら一連の法線分布関数を用いたレンダリング方法では、局所的な微細形状から全体の外観を予測するので、計測領域を減らすことができる。

3. 外観予測

本章では、計測した表面微細形状を直接用いる方法と、

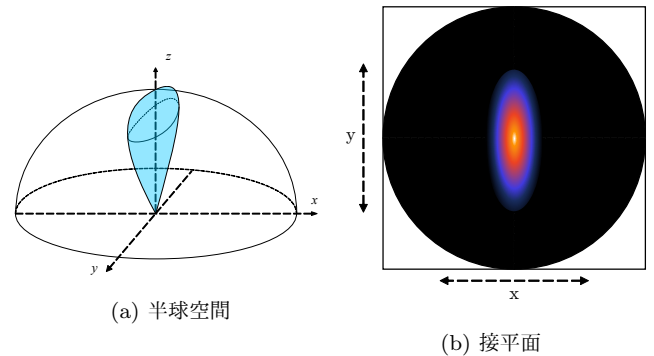


図4 法線分布関数の表現

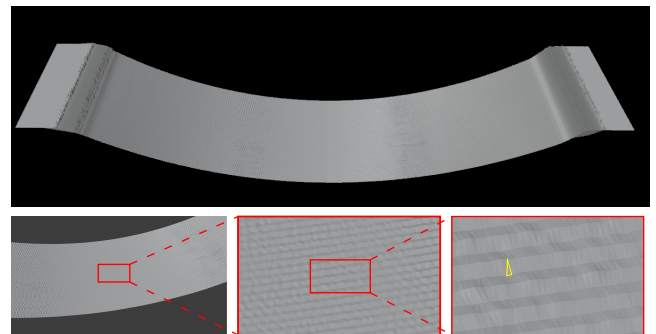


図5 計測微細形状の様子

法線分布関数として近似する方法によるレンダリング結果を示し、計測微細形状によるレンダリングの有効性を検証する。

3.1 実計測にもとづく評価

本計測では、図 2 に示す金属部品を計測対象とした。この金属部品は、5 cm 角の立方体のアルミニウムの一面を逆蒲鉾状に切削したものである。切削の際には半径 2 mm のボールエンドミルを NC 加工機に取り付け加工した。切削された面を見ると、筋模様の加工不良や加工方向に依存した加工模様を確認できる。微細形状を得るために、金属部品の切削された面のうち 1 cm × 5 cm の領域を変位計により計測した。次に、計測した点群データをもとにドロネー三角形分割法によりメッシュを生成した。生成したメッシュを図 5 に示す。生成されたメッシュは、約 140 万ポリゴンであった。図中の黄色の三角形は一つのパッチを示している。

まず、計測によって得られた微細形状を直接用いて、BRDF は完全鏡面反射として外観を描画した。また、比較として CAD モデルも同様の条件で描画した。レンダリングには Mitsuba2 [7] のパストレーサーを用いて、800 × 800 の解像度、サンプル数 64 にて生成した。利用した光源環境を明示するために、大気と異なる屈折率を適用した球と完全鏡面反射 BRDF を適用した球を共に描画した。生成した外観を図 6 に示す。CAD モデルと比較して計測形状を用いた外観は、計測対象の外観と同様、表面全体で加工

不良・加工模様を確認することができた。しかしながら、物体表面にアーティファクトが発生していることが分かった。これは、レンダリング方程式をパストレーシング法で解いていることに起因していると考えられる。すなわち、1つの画素に複数のパッチが含まれた時に、鏡面反射だと小さなパッチにエネルギーが集中するためだと考えられる。この課題を解決するためには、膨大なサンプリングが必要となり、将来的にインタラクティブに実行可能な外観検査を目指す場合に実現が困難になることが懸念される。

3.2 計測からの法線分布関数の推定

本節では、前述した高さマップから法線分布関数を求める手法の有効性を検証し、これを手法を金属部品に適用した結果について述べる。まず、計測対象物の法線分布関数を式(3)によって得られていることを実験により検証する。既知の微細な表面形状を有する図7に示す比較用表面アラサ標準片を対象として表面形状を計測する。標準片とは、工具ごとに加工された切削面がまとめられたものであり、金属加工の評価基準として用いられている。本実験では、標準片の粗さ $3.2 \mu\text{m}$ のそれぞれフライス加工された面と正面フライス加工された面を対象に表面形状を計測し、さらに法線分布関数を求めた。本実験では、各切削面の $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ の領域を計測し、このとき得られた表面形状の高さマップを図7に示す。標準片は標準としての基準を満たしていることから、各切削面は、巨視的に平面と見なせる。このことから、マクロ法線を $(0,0,1)$ とした。さらに、得られた高さマップの各画素データを3次元の点に見立てドロネー三角形分割法によりメッシュを生成する。このとき含まれる全ての三角形の法線とその面積から、法線分布関数を算出した。

次に、得られた法線分布関数を可視化するために、 1024×1024 に離散化された接平面に分布をプロットした(図8)。フライス加工のマクロ法線はほとんどマクロ法線と一致しているのに対し、正面フライス加工のマクロ法線は、加工方向に対して直交するように分布していることが確認できる。この結果は切削面の高さマップの特徴と一致しており、計算によって求められた法線分布関数の妥当性が示されている。

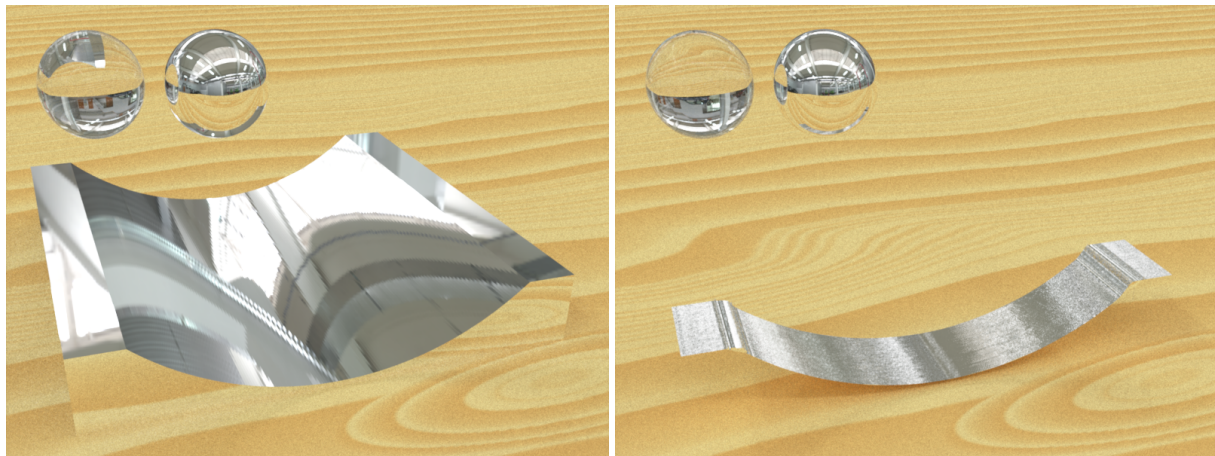
次に、金属部品の切削面を対象として法線分布関数を求める。計算する領域を制限するために、微細形状の中央付近の 5 mm 四方の領域を切り出した。切り出した領域は巨視的にはやや曲面になっているが、本実験では平面であると仮定しマクロ法線を $(0,0,1)$ とした。標準片と同様にメッシュに含まれる三角形の法線と面積を求め、法線分布関数を計算した。どの程度の異方性が現れているかを比較するために、式(2)より異方性のある法線分布関数を計算した。得られた法線分布関数を 512×512 に離散化された接平面にプロットした。得られた法線分布関数を図9に示

す。金属部品の法線分布関数には、加工方向に対応した異方性が見られ、4つのピークが生じている。これらのことから、GGX に比べて分布が複雑であり、モデル化が困難であることが分かる。

3.3 法線分布関数を用いた外観予測

金属部品の法線分布関数の外観への影響を評価する実験を行った。シーンの照明には、複数の光源による反射輝度の変化を無くすために、点光源を用いた。また、無数の視点と光源方向に対する反射輝度を同時に評価するために法線分布関数を適用する形状には円柱を用いた。レンダリングする法線分布関数には、前節で求めた金属部品の法線分布関数と、異方性を確認するために 90 度回転させたものを準備した。また、比較として法線分布関数を用いない鏡面 BRDF と異方性のある GGX から求めた法線分布関数を用いて、それぞれの外観を描画した。結果を図10に示す。鏡面 BRDF では、円柱に周囲の環境がくっきりと写っている一方で、計測された法線分布関数は、水平方向に切削加工が施されたような異方性反射を示している。この特徴は、異方性のある GGX の外観と一致している。また、GGX に比べて複雑なハイライトを示している。入力する法線分布関数を 90 度回転させた場合には、回転させていない場合に比べ見た目が大きく変わっていることから、法線分布の異方性が外観に現れていることが分かる。これらのことから、計算された法線分布関数は金属の外観を予測するのに利用できると考えられる。

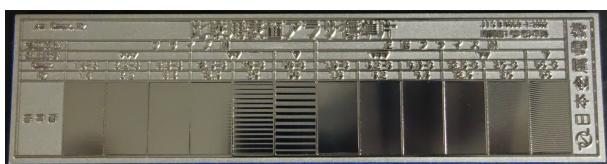
次に、一部の切削面の計測を用いて、金属部品の表面全体に広がる加工模様を表現できるかを評価するために、金属部品の計測から求めた法線分布関数を用いて CAD モデルの外観を描画した。図2に示す CAD モデルは約 900 ポリゴンで構成されている。レンダリングの過程では一画素に含まれるパッチ数が減ることからアーティファクトが低減されることが期待される。生成された外観を図11に示す。GGX を用いた外観では、異方性を示すハイライトが現れている。一方、計測された法線分布関数を用いた外観は、加工模様が再現できることを期待していたが、拡散反射をしているような見た目が確認された。また、微細形状を直接用いた結果と比較して、アーティファクトの低減は見られなかった。これは、法線分布関数の計算に用いた領域が、加工模様を表現するには大きすぎたことによると考えられる。また、表面微細形状の法線計算において計測ノイズの影響を大きく受け、法線分布関数に外れ値を持つピークが現れたことも原因と考えられる。加工模様の再現には、適切な大きさの領域で法線分布関数を求め、空間的に変化する法線分布関数を計算することが重要になると考えられる。また、加工不良の再現にはなお全域の微細形状を計測する必要があると考えられる。



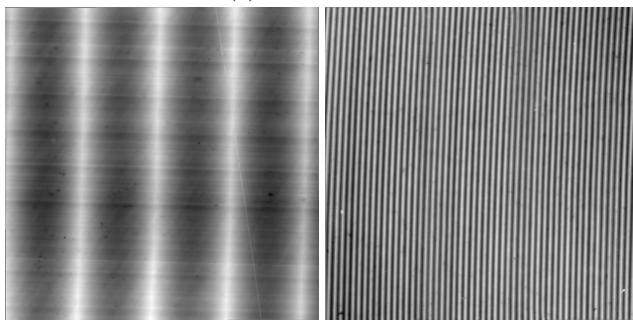
(a) CAD モデル

(b) 計測形状

図 6 完全鏡面反射による見た目



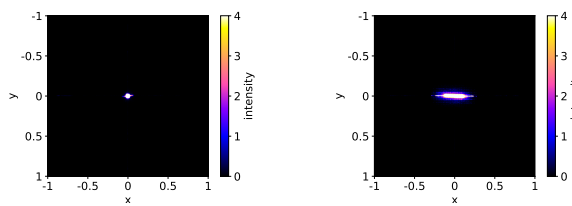
(a) アラサ標準片



(b) フライス加工

(c) 正面フライス加工

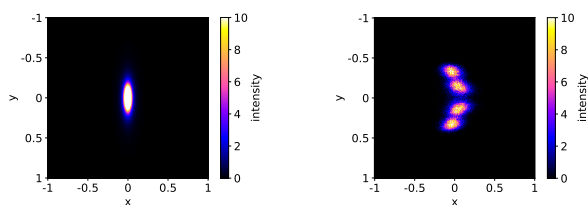
図 7 アラサ標準片とその高さマップ



(a) フライス加工

(b) 正面フライス加工

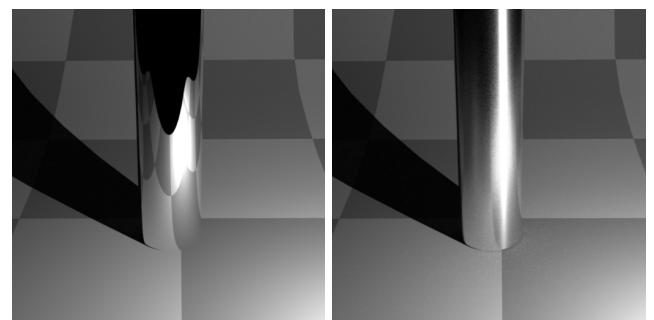
図 8 工具による法線分布関数の違い



(a) GGX $\alpha_x = 0.03, \alpha_y = 0.1$

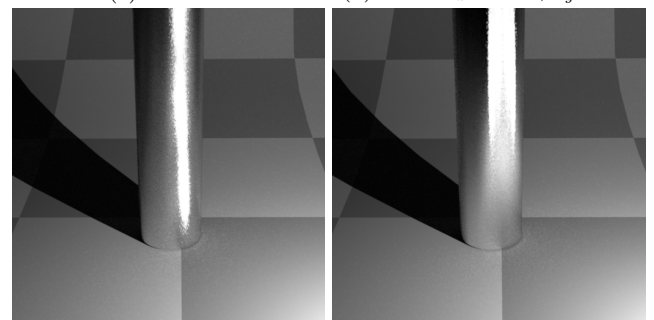
(b) 局所領域の法線分布関数

図 9 切削面の法線分布関数



(a) 完全鏡面

(b) GGX $\alpha_x = 0.03, \alpha_y = 0.1$



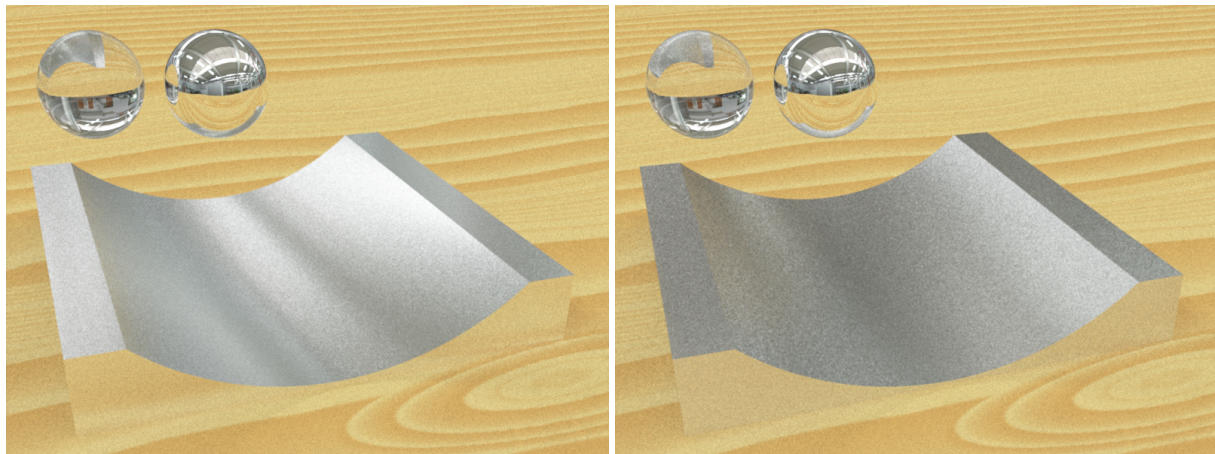
(c) 計測した法線分布関数

(d) 90度回転

図 10 法線分布関数による外観の違い

4. まとめ

本論文では、切削加工された金属を対象とし、デジタルツインの概念を導入することで審美的な外観検査を仮想的に実現することを目的として、計測形状にもとづいたレンダリングと法線分布関数を用いた近似によるレンダリングを試行した。実験の結果、計測形状のみを用いたレンダリングでは、見た目に近い外観を予測できることを確認した。一方、法線分布関数を用いた近似では、期待通りの加工模様は再現できなかったが、改善の手がかりを得た。今後はこの知見を活かし、加工模様を再現できるような適切なスケールでの法線分布関数の計算について探索する予定である。さらに、計測ノイズの外観への影響を低減すべく、



(a) GGX $\alpha_x = 0.03, \alpha_y = 0.1$

(b) 局所領域の法線分布関数

図 11 局所領域の法線分布関数を用いた外観予測

微細形状から法線分布関数を求める手法について改善を図る予定である。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 JP19H04138 の助成を受けたものです。

[13] Yan, L.-Q., Hašan, M., Jakob, W., Lawrence, J., Marschner, S. and Ramamoorthi, R.: Rendering Glints on High-Resolution Normal-Mapped Specular Surfaces, *ACM Trans. Graph. (Proceedings of SIGGRAPH 2014)*, Vol. 33 (2014).

参考文献

- [1] Blinn, J. F.: Models of light reflection for computer synthesized pictures, *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH '77)*, p. 192–198 (1977).
- [2] Burley, B.: Physically-based shading at disney, ACM SIGGRAPH 2012 Course: Practical Physically-based Shading in Film and Game Production. SIGGRAPH '12 (2012).
- [3] Cook, R. L. and Torrance, K. E.: A reflectance model for computer graphics, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 1, No. 1, pp. 7–24 (1982).
- [4] Dong, Z., Walter, B., Marschner, S. and Greenberg, D. P.: Predicting appearance from measured microgeometry of metal surfaces, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 1 (2015).
- [5] Heitz, E.: Sampling the ggx distribution of visible normals, *Journal of Computer Graphics Techniques*, Vol. 7, No. 4, pp. 1–13 (2018).
- [6] Kajiyama, J. T.: The Rendering Equation, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 20, No. 4, p. 143–150 (1986).
- [7] Nimier-David, M., Vicini, D., Zeltner, T. and Jakob, W.: Mitsuba 2: A retargetable forward and inverse renderer, *SIGGRAPH Asia* (2019).
- [8] Torrance, K. E. and Sparrow, E. M.: Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 57, No. 9, p. 1105–1114 (1967).
- [9] Trowbridge, T. S. and Reitz, K. P.: Average irregularity representation of a rough surface for ray reflection, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 65, No. 5, p. 531–536 (1975).
- [10] Walter, B., Dong, Z., Marschner, S. and Greenberg, D. P.: The ellipsoid normal distribution function. Supplementary material (2016).
- [11] Walter, B., Marschner, S. R., Li, H. and Torrance, K. E.: Microfacet models for refraction through rough surfaces, *Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 195–206 (2007).
- [12] Ward, G. J.: Measuring and modeling anisotropic reflection, SIGGRAPH '92, pp. 265–272 (1992).