

木材の質感を伝達する製品提案手法の開発と家具製品への応用（第3報） 3Dモデルの粗雑さと視覚的な違和感の関係

山口穂高*, 藤巻吾朗*

Development of Communication Method Presenting Wooden Visual Textures and Application for Furniture (III) Relationship between 3D model's Roughness and Visual Strangeness

YAMAGUCHI Hodaka*, FUJIMAKI Goroh*

近年は家具製品のオンライン販売が盛んになっており、木製品の質感を適切に伝達する手法の開発が望まれている。ここでは、木製品の見た目の質感のうち、3Dモデルを活用した製品形状の正確な伝達に着目し、3Dモデルの粗雑さと視覚的な違和感の関係を調査した。まず、家具の脚部材を想定した丸棒モデルと背もたれ部材を想定した曲面モデルを異なるポリゴン数で表現し、その表面のディスプレイ上でのなめらかさを被験者に評価させた。続いて、実際のダイニングチェアの3Dモデルを異なるポリゴン数とスムージング強度で作成し、その見た目の違和感を実物の写真と比較するウェブアンケートによって調査した。これらの実験結果より、表現したい形状に応じた3Dモデルのポリゴン辺長を算出した。

1. 緒言

製品の3Dモデルは、設計、製造の各プロセスだけでなく、製品提案プロセスにおいてもその利用価値は高い。3Dモデルは対象物の全体の形状情報を保有しているために、例えば、バーチャルリアリティ (VR) 空間にモデルを読み込んで共有することで、観察者が自由な視点から対象物を確認できるようになる。

なお、3DCGやVRに用いられる3Dモデルは、三次元座標を持つ各点を辺で結んで表現するメッシュデータが用いられることが一般的であることから、以降3Dモデルとはメッシュデータのことを指し、メッシュデータを構成するひとつひとつの三角形をポリゴンと表記する。

これまで、木製家具の製造工程の実情から、実木製家具の3Dスキャンデータより3Dモデルを取得する手法を検討しているが、得られたモデルをVR等の他ソフトウェアに読み込む際には、そのデータ容量がしばしば課題となる。3Dモデルのデータ容量は形状を表現するポリゴン数と比例関係にあるため、より軽量なモデルを得るためには、基本的に

はポリゴン数を削減すればよい^{1,2)}。一方で、モデルのポリゴン数が少ないと反対にポリゴンの辺長は長くなり、複数の直線で曲線を近似するように、表現する形状が粗雑になる。そのため、3Dモデルの作成者は形状をどの程度まで粗雑にしてよいのかを判断する必要がある。

3Dモデルを製品提案プロセスのようなビジュアル用途で用いる場合は、その粗雑さの適値評価、すなわちコントラストの判断は人の知覚に基づくべきである。人のコントラスト感度は空間周波数によって異なることが知られており³⁾、領域間のコントラストはその明暗の差が小さいほど、また、同じ明暗差でも領域のサイズが小さいほど知覚できなくなっていく。この特性を利用して、Hoppe⁴⁾は仮想空間内で遠くに配置される対象ほどメッシュを粗くする手法を提案し、Naderら⁵⁾はコントラスト感度曲線に応じたメッシュの適応的分割手法を提案している。

上記を踏まえ、我々は木製家具の3Dモデルのデータ容量の削減に際し、ポリゴン間のコントラストと視覚的な違和感の関係性に着目した。なお、コントラスト感度を支配する2変数のうち、明暗の差は様々なレンダリング条件に影響を受けてコント

* 試験研究部

ロールが困難なため、ここでは特にポリゴンの辺長を変数として扱った。

本研究の目的は、木製家具の3Dモデルにおいて、表現したい形状の表現力を保った軽量なモデルを得るために、そのポリゴン辺長の目安を算出することである。本研究は以下の2つの実験より3Dモデルの粗雑さと視覚的な違和感の関係を段階的に検討した。一方は、単純形状を用いたなめらかさの評価であり、曲面を再現する形状を数値的に制御した。もう一方は、実際の椅子形状を用いた違和感の評価であり、3Dスキャンによって得た椅子形状のポリゴン数とスムージング強度を制御した。

2. 単純形状を用いた表面のなめらかさの評価

2.1 概要

刺激の数値的な制御が可能な単純形状を対象として、ポリゴンの粗雑さが見た目の印象に与える影響を微視的に検討した。その際、形状には木製品の部材を想定した丸棒と曲面の2種類を採用し、主観評価の対象は曲面のなめらかさとした。

2.2 サンプル形状の作成

丸棒形状は木製家具の脚部材や面取り形状を想定して、底面の半径の異なる3種類を作成し、サンプル名をその半径に応じてR5、R10、R30とした。なお、棒の長さはいずれも200mmとした。曲面形状は、横長の背板部材を想定して、W500×H200mmの面を単一半径で曲げた形状とした。サンプル名は長辺方向に凹R250で曲げた形状をconcave250、短辺方向に凸R750で曲げた形状をconvex750、両者の複合形状をcomplexとした。これらの形状において、ポリゴン辺長をそれぞれ以下の手順で変更した。

丸棒形状においては、底面の円に内接する正多角形を3DCADソフト (Autodesk、Fusion360) によって複数製図し (15段階)、高さ200mmの多角柱を作成した。この際長さ方向には面を分割しなかったため、真円柱を意図している丸棒要素を内接する正多角柱で近似したこととなる。この丸棒形状におけるポリゴン辺長とは、底面の多角形の1辺の長さとして定義した。丸棒形状の各寸法を表1に示す。

曲面形状においては、3DCADソフトによって作成したサーフェース要素をターゲットポリゴン辺長0.5mmでメッシュ化したものを最も精細なモデルとし、その後、頂点の間引きコマンドを段階的に実施することでポリゴン数の異なる形状を取得した (8段階)。曲面形状におけるポリゴン辺長は含

表1 丸棒形状における近似多角形の寸法

Number of edges	Central angle	Edge length(mm)		
		R5	R10	R30
360	1/180 π	0.087	0.175	0.524
180	1/90 π	0.175	0.349	1.047
144	1/72 π	0.218	0.436	1.309
108	1/54 π	0.291	0.582	1.745
72	1/36 π	0.436	0.872	2.617
60	1/30 π	0.523	1.047	3.140
48	1/24 π	0.654	1.308	3.924
36	1/18 π	0.872	1.743	5.229
24	1/12 π	1.305	2.611	7.832
20	1/10 π	1.564	3.129	9.386
18	1/9 π	1.736	3.473	10.419
12	1/6 π	2.588	5.176	15.529
10	1/5 π	3.090	6.180	18.541
8	1/4 π	3.827	7.654	22.961
6	1/3 π	5.000	10.000	30.000

表2 曲面形状におけるポリゴン数と平均辺長

concave250		convex750		complex	
polygons	mean length(mm)	polygons	mean length(mm)	polygons	mean length(mm)
894,016	0.509	910,806	0.504	874,512	0.510
89,308	1.683	90,978	1.688	87,317	1.690
44,666	2.387	45,492	2.393	43,667	2.392
8,925	5.351	9,102	5.340	8,734	5.365
4,463	7.578	4,544	7.571	4,371	7.584
888	16.900	909	17.013	872	16.977
444	24.206	451	24.092	432	24.512
88	55.254	91	54.239	86	55.701

まれる全ポリゴンの平均辺長と定義した。表2に曲面形状のポリゴン数と平均辺長を示す。

2.3 刺激画像の作成

得られたモデルを3DCGソフト (Luxion、keyshot10) 内の同一照明環境に読み込み、仮想プラスチックマテリアル (屈折率1.5、単灰色) を適用した状態でレンダリングを行った。サンプルは画角の中央に横向きに設置し、向かって右側が若干拡大されるようにパースを付けた。サンプルのサイズは、後述するディスプレイでの表示において画像の中心部で実寸大となるように調整を行った。得られた画像の解像度は3,840×2,160 pxであった。得られた刺激画像を図1に例示する。

2.4 刺激画像の評価方法

ポリゴン辺長の閾値を算出するために、往復を許可した調整法6) によって各サンプルの曲面のなめらかさを実験参加者に評価させた。3.2より得ら

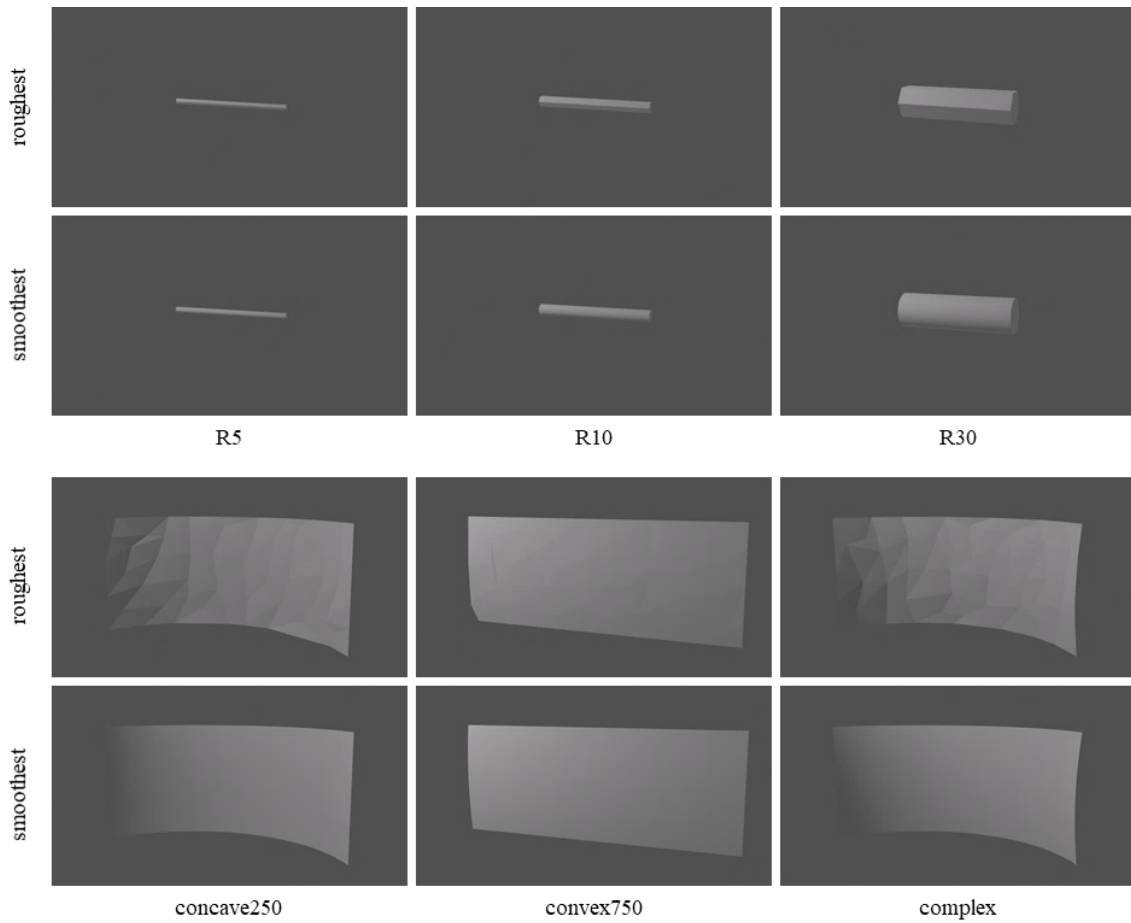


図1 単純形状で用いた刺激画像の例
 (上：丸棒形状、下：曲面形状、それぞれ最も粗い画像と最もなめらかな画像を例示)

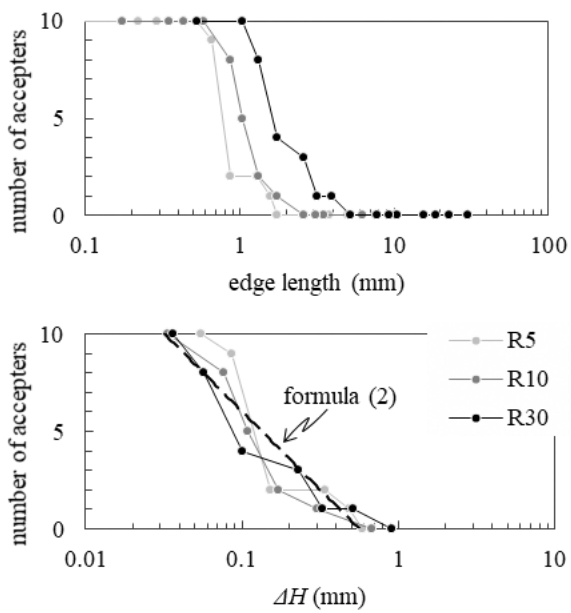


図2 丸棒形状の結果
 (下段の近似式は式(2)による)

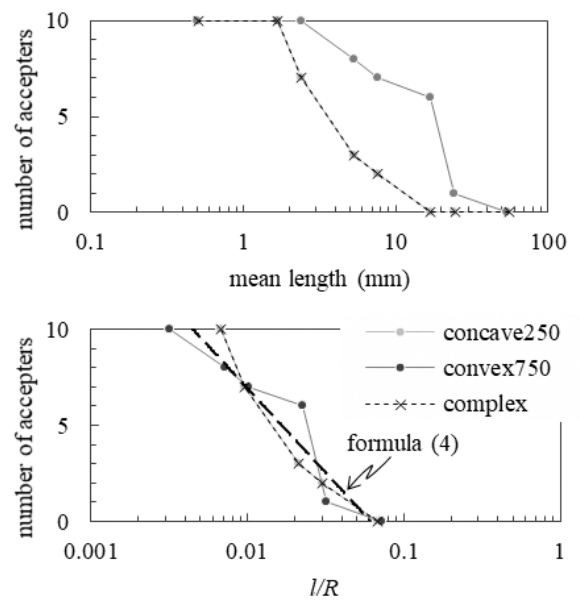


図3 曲面形状の結果
 (下段の近似式は式(4)による)

れた段階的な粗雑さを有する画像セットのうちの最も精細なものをディスプレイにフルスクリーン表示し、キーボード操作によって異なる粗雑さの画像へ自由に遷移できるようにした。参加者には、形状の表面のなめらかさが損なわれない限界の画像を探索するように教示し、参加者より申請された画像名を結果として記録した。ディスプレイには4K解像度を有する27インチ画面（I-O DATA、LCD-M4K271XDB）を用い、あご台によって回答者の額からディスプレイの中心間の距離を500mmに固定した。サンプルの評価はR30、R10、R5、convex、concave、complexの順に行った。参加者は0.7以上の視力（矯正視力含む）を有する成人10名であった。

2.5 結果に基づいたポリゴン辺長算出式の導出

丸棒形状について、なめらかさの許容者数の結果を図2に示す。この図の横軸には表1におけるポリゴン辺長と式(1)より算出された隣り合う頂点の高低差（ ΔH ）を示す。

$$\Delta H = l \sin(\theta) \quad (1)$$

l : edge length, θ : external angle = central angle

この結果より、ポリゴン辺長が長くなるほど、つまり、円柱を辺の数が少ない多角形で近似するほど、なめらかさの許容者数は低下する傾向が確認された。また、ポリゴン辺長となめらかさの関係は丸棒の半径によって異なっており、半径が小さな丸棒ほどなめらかさの判断は厳しくなった。一方で、 ΔH を用いることで丸棒の半径によるばらつきを小さくできることが確認されたことから、丸棒形状の判断は多角形の隣り合う頂点の高低差に着目して行われることが示唆される。

そこで ΔH に着目し、3種類の丸棒の結果のうち、それぞれで許容者数が最後に10となった結果から最初に0となった結果までを用いて対数関数による回帰分析を行った。

$$y = -3.49 \ln(\Delta H) - 2.00, R^2 = .876 \quad (2)$$

この式により、必要ななめらかさの許容度（0～10）に必要なディスプレイ上の見かけの ΔH を算出することが可能である。 ΔH が定まれば、表現したい丸棒の半径（適用推奨域：R5～R30）を式(1)に代入することで、3Dモデルに必要なポリゴン辺長の目安を算出することができる。実験では500mm離れた位置のディスプレイに実寸相当でサンプルを表示したが、表示倍率が違う場合は式(2)の ΔH を見

かけの値として扱い、見かけの ΔH を表示倍率（実寸比）で除することでモデル寸法における ΔH へ換算することができる。例えば、式(1)(2)を用いて半径20mmの丸棒を実寸比25%で表示する場合に、なめらかさの許容度が10（最大）必要であるとする、ポリゴン辺長の目安は2.268mmと計算され、この程度の辺長が満たされるポリゴン数まではモデルを軽量化してよいことと見積られる。ディスプレイサイズと観察距離が異なる場合は、 ΔH を長さから視角に換算することで式(2)の適用が可能となるが、実用上はディスプレイサイズと観察距離を一意に定めることは困難である。本研究の実験条件（ディスプレイ幅約600mm、観察距離500mm）では水平方向の視角は約62°となることから、この範囲での実寸大よりも拡大して表示されることが想定されない限り、式(2)より算出されるポリゴン辺長は安全な見積もり量として扱ってよいと言える。

同様に、曲面形状の結果を図3に示す。この図の横軸には表2におけるポリゴン辺長と式(3)より算出されたポリゴン辺長と曲げ半径の比（ l/R ）を示す。

$$l/R = l_{\text{mean}} / BR \quad (3)$$

l_{mean} : mean length, BR : bending radius

この結果より、丸棒形状と同様に、ポリゴン辺長が長くなるほど、なめらかさの許容者数が低下することが確認できる。また、その関係は曲面の曲げ方によって異なっており、convex750よりもconcave250の方がなめらかさの判断が厳しい結果となった。曲げの方向が異なるサンプル間の比較ではあるが、丸棒の考察と同様に、曲率が小さいほど曲面のなめらかさの判断が敏感になることが示唆される。また、complexの結果はconcave250と重なっており、複数の曲率が含まれる曲面形状においては最も小さな曲率の表現がなめらかさの評価に支配的であることが示唆される。よって、complexにおける BR には250を用いて l/R を算出した。図3より、 l/R を用いることで曲げ半径による結果のバラつきが小さくなることが確認され、曲面形状におけるなめらかさはポリゴン辺長と曲げ半径の比に着目して判断されたことが示唆される。よって、 l/R を説明変数として、丸棒形状のそれと同様に回帰式を算出した。

$$y = -3.83 \ln(l/R) - 10.68, R^2 = .918 \quad (4)$$

この式によって所望のなめらかさの許容度に必要な l/R が算出でき、これはディスプレイサイズと

観察距離に寄らずに定まる。さらに式(3)に表現したい曲げ半径(適用推奨域: R250~R750)を代入することで必要なポリゴン辺長の平均値 I_{mean} が算出できる。また、表示倍率の違いは算出された I_{mean} に加味すればよい。例えば、式(3)(4)を用いて曲げ半径300mmの曲面形状を実寸比25%で表示して、必要ななめらかさの許容度を10(最大)とすると、辺長の目安は5.404mmと計算される。

丸棒形状と面形状の判断基準に対する違いは、丸棒形状において正多角柱の側面をポリゴンに分割していないためだと考えられる。表現したい3Dモデルに丸棒形状と面形状の両者が含まれる場合は、式(2)(4)より必要なポリゴン辺長をそれぞれ算出し、小さい方を必要なポリゴン辺長の目安とすることがより安全側の判断になると言える。

3. 実際の椅子の形状を用いた違和感の評価

3.1 概要

2章においては、単純形状において3Dモデルの粗雑さを微視的に評価したが、より実際的な形状を対象とした巨視的な評価も必要である。この章では、実際の木製ダイニングチェアの3Dスキャンデータを用いて、その形状の粗雑さを段階的に検討した。ここでは、3Dスキャンによって得たデータ処理の実状を考慮して、頂点の数を削減する単純化処理と測定ノイズを除去するために表面をなめらかにするスムージング処理の2つの強度を実験変数とした。主観評価の対象は、表面のなめらかさよりも高次な感覚であると仮定される全体的な違和感とし、ウェブアンケートを用いて実写画像と3DCG画像の比較実験を行った。

3.2 サンプルモデルの作成

肘付き木製ダイニングチェア(株式会社シラカワ、Raptアームチェア、W590×D560×H890mm、布張地)を3Dスキャナ(Artec 3D、EVAおよびArtec Studio 15)によって計測したメッシュデータをサンプルとし、ポリゴン数約13Mのオリジナルのモデル(13M(init.))に単純化処理とスムージング処理をそれぞれ段階的に施した。

頂点の間引きを行う処理(コマンド名:高速単純化⁷⁾)6段階と形状の特徴に応じて合理的な頂点削減を行う処理(コマンド名:メッシュ単純化⁷⁾)1段階の計7種類の単純化処理を施したモデルを作成した。なお、ここでの合理的な頂点削減とは、平坦な領域の点を積極的に間引く処理のことを指す。

3Dスキャンによって得られたメッシュデータは測定された微細な凹凸やノイズをそのまま含むため、スムージング処理によって表面をなめらかにする場合があるが、過度なスムージングはマクロな凹凸形状まで歪める。そのため、3Dスキャンデータの実用では、ポリゴン数の削減とは別にスムージング強度の検討が必要となる。本研究で使用したソフトウェアでは、スムージング処理(コマンド名:スムージング⁷⁾)はその繰り返し回数を指定する方式であったため、処理回数を7段階に変化させたモデルを作成した。また、変化の程度を一般化するために、検査ソフトウェア(Geomagic、Control

表3 椅子形状モデルの詳細

	name	polygons	mean length(mm)	RMS
	13M(init.)	13,074,749	0.521	reference
simplifying	6M	5,999,999	0.714	n. c.
	600K	599,999	2.315	
	250K	249,999	3.562	
	100K	100,000	5.340	
	75K	74,999	5.421	
	50K	50,000	5.504	
	230K(opt.)	231,116	3.394	
smoothing	sm.1		0.501	0.007
	sm.5		0.481	0.031
	sm.10		0.479	0.056
	sm.25	13,074,749	0.477	0.119
	sm.50		0.474	0.206
	sm.100		0.471	0.346
	sm.500		0.458	1.135

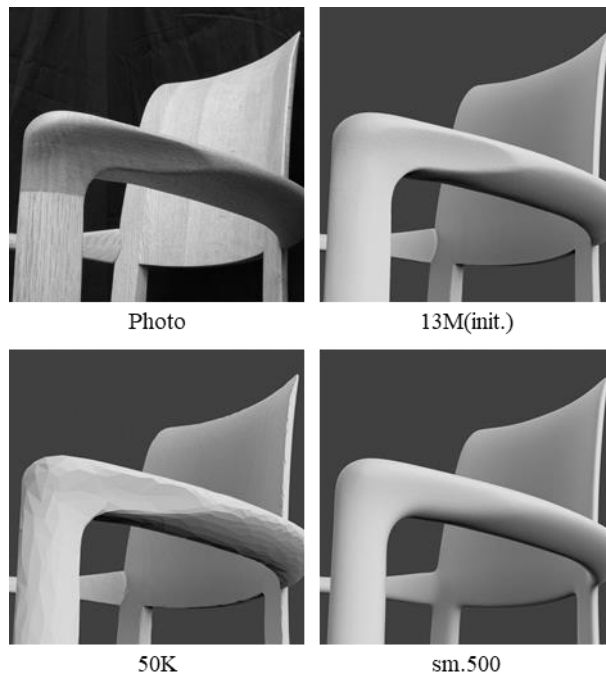


図4 椅子形状モデルのクローズアップ画像の例

X) を用いてそれぞれのモデルを13M(init.)と比較した形状変化量(RMS)を算出した。RMSは全頂点における法線方向の偏差の二乗平均平方根であり、法線方向の形状の違いを実寸単位で包括的に表す。以上より得られたモデルの詳細を表3に示す。

3.3 刺激画像の作成

デジタルカメラを用いて、サンプルの実物を撮影した。画角はサンプル右斜め上からの全景と左アーム部のクローズアップの2種類とした。また、色味の影響を除外するために、撮影された画像をモノクロ画像へ変換し、1,024×1,024の正方形にトリミングしたものを実写画像と定義した。

得られた3Dモデルを3DCGソフトウェア内に読み込み、実写と同様のアングルと明暗になるように画角とマテリアルを調整して2種類の画角のCG画像をモデルごとに描画した(解像度1,024×1,024px)。得られた画像を図4に例示する。

3.4 ウェブアンケートの方法

条件ごとに評価用の1ページには実写画像、3DCG、質問文の1セットを表示した。画像は、650×650の

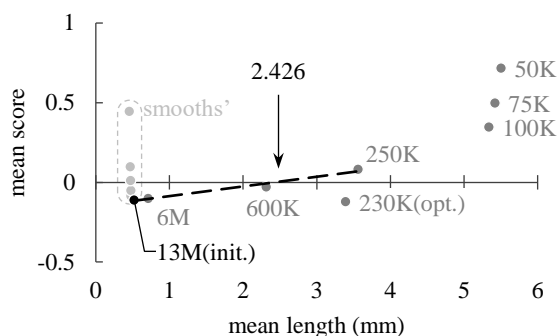


図5 平均ポリゴン辺長と平均評点の関係

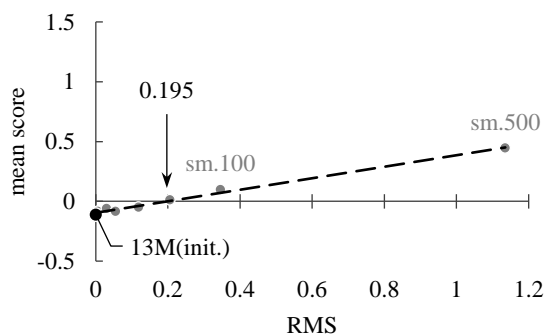


図6 RMSと平均評点の関係

サイズに縮小して、実写画像、3DCGの順に上下に並べて表示した。評価は、3DCGを実写画像と比較した際の「形状」の違和感のあり/なしとし、5段階尺度(-2:ない、-1:どちらかといえはない、0:どちらともいえない、1:どちらかといえはある、2:ある)で回答を収集した。解析の際は、尺度間を等間隔とみなして評価を-2から+2の評点に換算し、0点(どちらでもない)以下を違和感の許容範囲と定義した。

全30条件で作成した評価用のウェブページは、まず全景画像条件の15モデルをランダム順で呈示し、その後クローズアップ画像条件15モデルをランダム順で呈示した。

以上の設定を施したウェブアンケートは調査会社を介して2022年1月19日から21日の3日間に行った。回答は312名の成人より得られたが、全30条件で評点に差をつけなかった回答を除いた279件を有効回答として平均評点を算出した。なお、参加者が回答の際に用いたデバイスや画像の表示倍率は不明であり、ここではそれらの違いを考慮せずに包括的に求めた代表値による検討を行った。

3.5 結果と考察

全景写真においては、モデル間の評価の差が見られなかった。よって、本研究で用いたモデル粗雑さとスムージング強度の範囲は、一般消費者が画面で製品の全景を確認する際に形状の違和感を感じるレベルまで達していなかったと言える。

クローズアップ写真において得られた平均評点とモデルのポリゴン辺長の関係を図5に示す。単純化処理を行ったサンプル群に着目すると、ポリゴン辺長が長くなるほど違和感が上昇している傾向があり、特に100Kより粗いモデルで違和感が急激に上昇した。そこで、これらと230K(opt.)を除いた13M(int.)から250Kの4点を用いて、直線回帰式から違和感の許容範囲を求めた結果、平均評点が0以下となる平均辺長の上限は2.426mmと計算された。よって、この値が実用を想定した際のポリゴン辺長の目安になると言える。また、合理的な頂点削減を行った230K(opt.)と単純な頂点削減を行った250Kを比べると、230K(opt.)の平均評点が低く、形状の特徴に基づいた頂点削減は効果的であった。一方で、合理的な頂点削減は頂点の間引きに比べて処理時間がかかる(本環境において13M(int.)から250Kは3分、13M(int.)から230K(opt.)は45分)ため、準備できるリソースとモデルの用途のバランスを考慮して手法を選択することが必要である。

スムージング処理を行ったモデル群の平均評点

とRMSの関係を図6に示す。この結果より、RMSが大きいほど違和感が線形に増加している傾向が観察される。オリジナルモデルを含む7点を直線回帰式にあてはめ、違和感の許容範囲を求めると、平均評点が0以下となるRMSの上限は0.195mmと計算された。以上の結果から、想定したモデルと刺激画像においては、モデルの法線方向の偏差が0.195mm程度以下となる範囲内であれば、スムージングを繰り返しても主観的な違和感は許容できるレベルに抑えられることが示唆される。なお、RMSとスムージング回数の関係はモデル形状に依存するため一意には定められないが、本条件では、表3より、RMS 0.195mmはスムージング回数50回程度と対応する。

4. まとめ

本研究では、木製家具製品を視覚的に表現する3Dモデルに最低限必要なポリゴン辺長の目安を算出することを目的として、3Dモデルの粗雑さと視覚的な違和感の関係を調査した。

丸棒と曲面の単純形状を用いた視認実験から、その表面のなめらかさを表現するのに最低限必要なポリゴン辺長を求めた。これにより、表現したい形状と想定する表示倍率が明確な場合に、必要ななめらかさを満たすポリゴン辺長の目安を算出することが可能となった。

次に、より実用場面を想定して、3Dスキャンによって得られた木製ダイニングチェアの3DCGと実写画像を比較した際の視覚的な違和感をウェブアンケートによって調査した。その結果、一般消費者が椅子形状をクローズアップして3DCGを観察する場合、違和感が出にくいポリゴン辺長の上限の目安は2.426mmであった。また、3Dスキャンデータのスムージングは、法線方向の偏差を0.195mm以内に抑えられる範囲で施されるべきであることが示され

た。

本研究で得られた結果は、特定のモデル形状と画像の呈示条件におけるものである。提案式は実験条件の範囲内に限って用いられることが望ましいことを申し添える。

参考文献

- 1) 仲林篤史：公開を目的とした3Dモデルのデータ量削減方法，デジタル技術による文化財の記録と利活用3，奈良文化財研究所研究報告，27，pp. 120-129，2021.
- 2) 金尚泰：リアルタイム3DCGコンテンツ制作用ポリゴン削減ソフトウェアの開発，デザイン学研究作品集，21(1)，pp. 32-37，2016.
- 3) 市原茂：空間周波数特性について，新編感覚・知覚心理学ハンドブック，大山正ら編，誠信書房，1994，pp. 560-561.
- 4) Hugues Hoppe：Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering，IEEE Visualization 1998 Conference，pp. 35-42，1998.
- 5) Georges Nader， et al.： Visual contrast sensitivity and discrimination for 3D meshes and their applications，Computer Graphics Forum，35(7)，pp. 497-506，2016.
- 6) 小谷津孝明：閾値の測定法，日科技連官能検査委員会編，新版官能検査ハンドブック，1973，pp. 395-397.
- 7) Artec 3D，Artec Studio 15 User's Guides，http://docs.artec-group.com/as/15/en/_downloads/25ad86ff3ec13dc8eae3208423c3eb81/Manual-15-EN.pdf，2022年2月参照