

HDRIを用いた物理ベースレンダリングによる 質感表現が設定しやすい環境の検討

東京工科大学

小杉勇翔 川島基展 三上浩司

株式会社バンダイナムコスタジオ

鈴木雅幸 菅野昌人 山口翔平

研究背景

近年のゲームコンテンツ、CGアニメーションコンテンツ制作について

- 背景やキャラクター制作において、**物理ベースレンダリング (PBR)** を用いた写実的な質感表現が有効であり、需要が高まる
 - PBRは物理的なパラメータ属性に基づく表現である
- ➡リアリスティックなマテリアル表現が可能



- **PBR**による写実的な質感表現を行う手法のひとつに**HDRIを用いたルックデブ環境**を利用した手法がある
 - 現実の光源をCG空間へ落とし込んだ環境
 - ルックデブ：3DCGモデルアセット（キャラクターや背景など）の見た目、表現（マテリアル）の様式の決定、調整を行う工程
 - HDRIを用いた現実のライティング環境を使用することにより、PBR向けマテリアルなどのアセットを安定的に制作が可能

研究背景

近年のゲームコンテンツ、CGアニメーションコンテンツ制作について

- PBRによる写実的な質感表現を行う手法のひとつにHDRIを用いたルックデブ環境を利用した手法がある



研究目的

ルックデブ環境に用いるHDRIによってマテリアル設定のしやすさが異なるのではないか



研究目的

- HDRIを用いたルックデブ環境を利用したPBRにおけるマテリアル設定において、どのようなルックデブ環境が有効であるのか検討
- ライティング環境がマテリアル設定においてどのように寄与するのか検証
 - アーティストにとってタンジブルという面から身近な環境である方がよいのか、モデルアセットに適した環境である方がよいのか

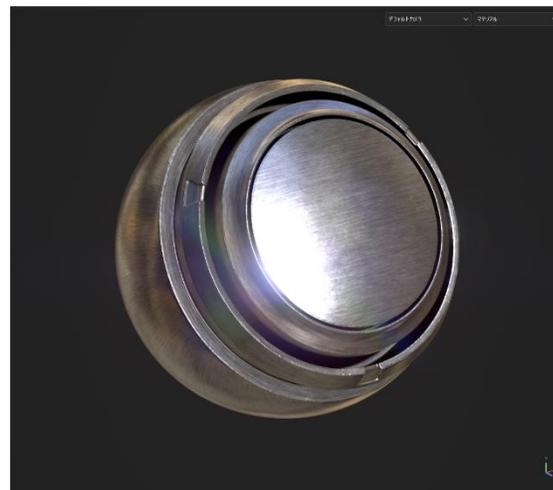
現状のマテリアル設定の問題

DCCツール、ゲームエンジンを利用したマテリアル設定

- Substance 3D PainterやUnreal Engineを利用し、パラメータやノードを調整することで意図したマテリアル設定を施すことが可能

しかし、シンプルな背景にライトが設定された制作環境や一般的なHDRI画像を利用した制作環境では**マテリアルが物理的に正しいのかどうか判断することが難しい**

- 一般的なHDRI画像では、正しい色や輝度、太陽輝度まで含めたレンジなどが欠けているため、現実的に正しいライティング環境にはなっていない



TrueHDRIの利用

TrueHDRIとは

- 株式会社バンダイナムコスタジオの菅野らが提供
- 現実世界の照明環境をそのままキャプチャすることを目的としたHDRIアセット
- DCCツールやゲームエンジンにおいて信頼性の高いルックデブ環境を構築できる



- ルックデブ環境だけでなく、制作現場においてアーティストやエンジニアがマテリアルやライティングについてコミュニケーションを行うための基準となる環境として利用するなど、広い活用方法が存在
- **PBR向けのマテリアルのアセットなどをより安定的に制作することが可能**



検証：検証の概要

仮説：ルックデブ環境において用いるHDRIの種類によってマテリアル設定のしやすさが異なるのではないか

➡ TrueHDRIによるライティング環境がマテリアル設定においてどのように寄与するのか検証

アーティストにとってどのようなルックデブ環境が有効であるのかを検討

検証環境

- TrueHDRIを使用したライティング環境と物理的に適切ではないライティング環境を使用

検証に利用するモデルアセット

- 現実に存在するモデルアセットとScience Fiction（以下SF）系のような非現実的なもののモデルアセットを利用

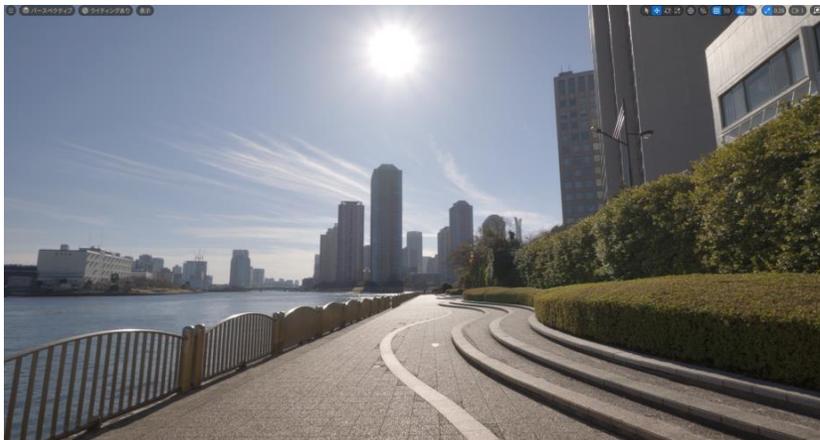
検証の対象について

- 3DCG制作経験年数が2年以上の東京工科大学の学生及び3DCGコンテンツ制作現場に携わっている株式会社バンダイナムコスタジオの社員を対象とする
- 3DCGコンテンツ制作の経験の差やコンテンツ制作における専門性の有無などを踏まえた検証を行う

検証：検証環境

検証に利用する環境

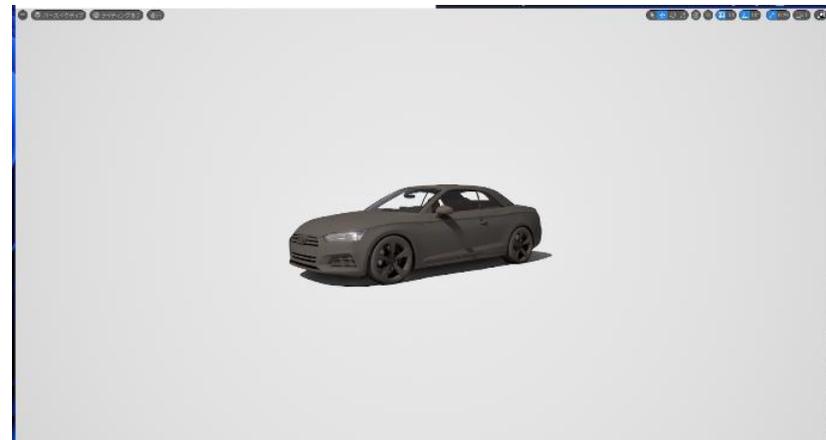
- 検証環境: Unreal Engine5を使用
- ① バンダイナムコスタジオの社員にとって身近である永代橋付近のTrueHDRIを利用した環境
- ② 東京工科大学の学生にとって身近である東京工科大学内のTrueHDRIを利用した環境
- ③ ディレクショナルライト（平行光源）のみを適用した背景が真っ白なライティング環境
 - 物理的に適切ではなくHDRIを使用しないライティング環境でのマテリアル設定の施し方の違いの検証を行うため用意



環境①：永代橋



環境②：東京工科大学



環境③：真っ白な背景

検証：検証に利用するモデルアセット①

- モデルA：実車のAudi A5
 - 普段目にすることができる車の例として利用
 - クロムやアルミ等の金属やプラスチックなどが使用されているため、PBRとして適切な設定を行うことが必要となる
 - ボディについては塗装が施された金属となっているため、設定として考慮したマテリアル設定を行う必要がある



モデルAのマテリアル設定

	マテリアル名	材質	特徴
①	MI_Car Paint	金属 (塗装)	色：タンゴレッド メタリック ・メタリック塗装が施されたカラー
②	MI_Metal_Frosted	金属 (アルミニウム)	・ガンメタリック色でパウダーコート塗装されたアルミホイール ・ソフトなザラザラ感の仕上がり
③	MI_Metal_Chrome	金属 (クロム)	・クロムパーツ
④	MI_Plastic_Glossy	プラスチック	・光沢感がある ・光の反射率80%を超えるような艶あり塗装が施された黒色のプラスチック
⑤	MI_Plastic_Satin	プラスチック	・光沢感が弱い ・光の反射率30%~40%程の艶あり塗装 (5分艶) が施された黒色のプラスチック
⑥	MI_Rubbe_Shiny	ゴム	・やや光沢感 (艶) があるゴム
⑦	MI_Textile Plain	布生地 (GermanA5)	・GermanA5と呼ばれる生地 ・生地はツイル織りであり、より織り目が細かく緻密な印象 ・渋い光沢感を持った非常に高級感のある生地 ・表地はアクリル繊維

検証：検証に利用するモデルアセット②

- モデルB：ドローン (Surveillance_Drone_Mk1_Used_Look)
 - 現実で私たちが見ることのないようなものの例として利用
 - 多くの部分が金属という形で設定
 - 特殊な塗装が施されたような金属として設定される



モデルBのマテリアル設定

	マテリアル名	材質	特徴
①	MI_BLACK_METAL	金属 (塗装)	・光の反射率70%程の艶あり塗装が施されている ・黒色に塗装された金属
②	MI_CHROME	金属 (アルミニウム)	・クロムパーツ
③	MI_DARK_GREY_METAL	金属 (塗装)	・光の反射率80%程の艶あり塗装が施されている ・グレーに塗装された金属
④	MI_GREY_METAL	金属 (塗装)	・光の反射率80%程の艶あり塗装が施されている ・青みのあるグレーに塗装された金属
⑤	MI_HULL_MAIN	金属 (塗装)	・光の反射率90%程の艶あり塗装が施されている ・ライトグレーに塗装された金属

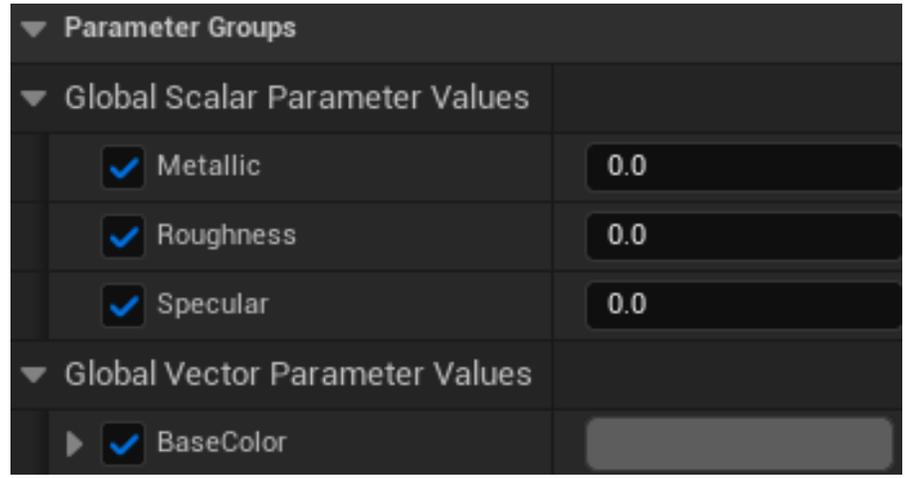
検証：マテリアル設定

マテリアル指示書を基に設定

- 2種類のモデルアセット画像とマテリアルの詳細について記載

4つの項目（パラメータ）を調整し、設定を行う

1. BaseColor（ベースとなる色）
2. Metallic（金属度合い）
3. Roughness（粗さ）
4. Specular（鏡面反射光）



各マテリアルの設定について①

MI_CarPaint
 設定箇所：赤
 車全体のボディペイント
マテリアルの設定
 色：メタリックレッド
 (実車：タンゴレッドメタリック)
 材質：金属 (塗装された金属)
 特徴：下図のようなメタリック塗装が施されたカラーとなっている。



Body Colours
 設定色

参考：
https://www.audi-sales.co.jp/cars/audi/limited/a4_redsola/index.html
<https://www.pront-shop.jp/viewitem/00000025620>



MI_Metal_Frosted
 設定箇所：水色
 ホイール

マテリアルの設定
 材質：金属 アルミニウム
 特徴：ガンメタリック色でパウダーコート塗装されたアルミホイールである。ソフトなざらざら感の仕上がりとなっている。右の参考画像の矢印部分のような塗装がされている。



設定色

ソフトなざらざら感の仕上がり
 参考：<https://uk.ahima-tire.com/psr/>

参考：<https://wagenworld.jp/?pid=14563566>

ノーマルマップは設定しているため、他パラメータでの参考画像のような質感のホイールになるように設定を行う。

MI_Metal_Chrome
 設定箇所：黄緑
 Audiのロゴ、フロントグリルの枠など
マテリアルの設定
 材質：金属 クロム
 特徴：金属光沢がある
 下の参考画像のクロムパーツのようなマテリアルの設定を行う。



参考：
<https://www.audi.co.jp/web/ai/models/a5/a5.html>

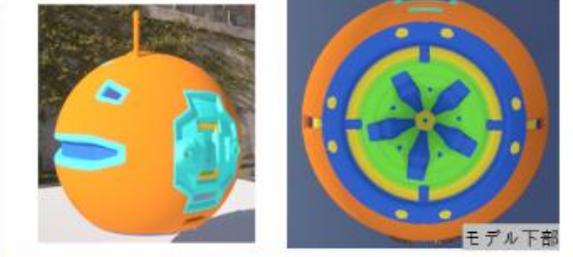
各マテリアルの設定について①

MI_BLACK_METAL 系
 設定箇所：水色
マテリアルの設定
 材質：金属 (塗装された金属)
 特徴：黒色の金属である (黒光りしている)
 表面は少しなだらかで反射が強い。光の反射率70%程の艶あり塗装 (下の画像の7分艶より少し反射の強い塗装) が施されており、黒色に塗装された金属となっている。



設定色

参考：<https://www.kintal-torvo.com/?mode=f10>



MI_DARK_GREY_METAL
 設定箇所：青
マテリアルの設定
 材質：金属 (塗装された金属)
 特徴：BLACK_METALよりは黒くないグレーの金属である。表面はBLACK_METALより少しなだらかで反射が強い。

光の反射率80%程の艶あり塗装 (右の画像の艶ありと同等くらいの塗装) が施されており、グレーに塗装された金属となっている。



設定色

参考：<https://www.kintal-torvo.com/?mode=f10>

MI_CHROME
 設定箇所：黄
マテリアルの設定
 材質：金属 (クロム)
 特徴：光沢がある
 下の画像のパーツのようなクロムの材質にあったマテリアル設定を行う。



クロムメッキが施されたパーツ
 参考：<https://nakanai.jp/ire9.html>

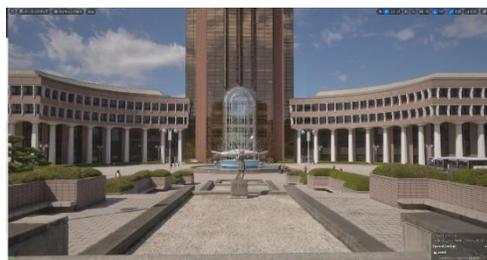
検証：検証手順

3つのグループに分かれ検証を実施

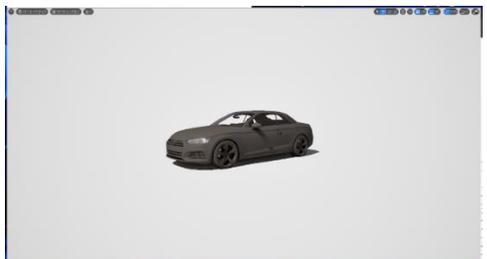
- 2種類のモデルアセットに対して使用するライティング環境を変えてマテリアル設定を行う



環境①：永代橋



環境②：東京工科大学



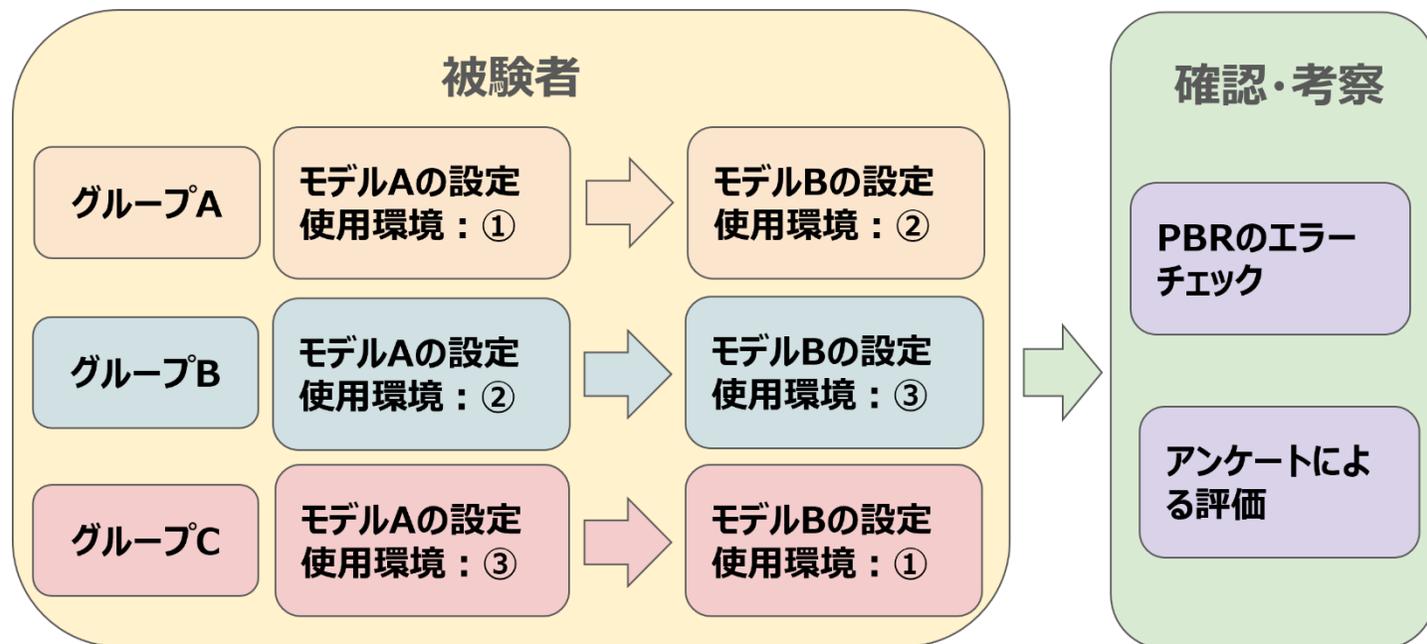
環境③：真っ白な背景



モデルA：Audi A5



モデルB：ドローン



検証結果：被験者とマテリアル設定を行ったモデル

被験者

- 東京工科大学の学生8名、バンダイナムコスタジオの社員3名の計11名

被験者が行った各ライティング環境下でのマテリアル設定を施したモデルの例は右の図のようになっている

被験者のグループ分けと所属一覧

被験者	グループ	所属
被験者1	A	BNS
被験者2	B	BNS
被験者3	C	BNS
被験者4	A	TUT
被験者5	B	TUT
被験者6	A	TUT
被験者7	C	TUT
被験者8	A	TUT
被験者9	B	TUT
被験者10	C	TUT
被験者11	A	TUT

永代橋



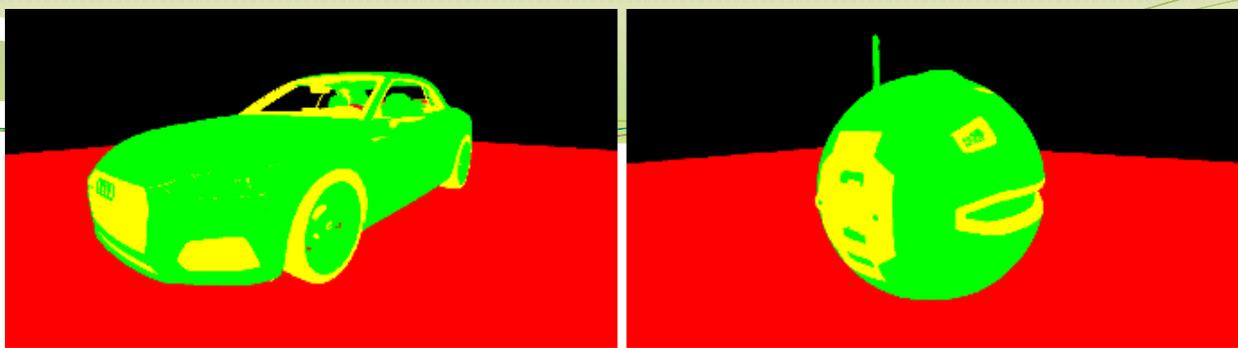
東京工科大学



真っ白な背景



検証結果：PBRエラーチェック



PBRエラーチェックフィルタの実装

- Adobe 「The PBR Guide」、Lagarde, S氏の考えを参考に実装
- BaseColorの値が50~240sRGBであればマテリアルが緑色に可視化
- 暗い値が0~30sRGB、明るい値が240sRGB以上の場合エラーとしてマテリアルが赤色に可視化
- 暗い値が30~50sRGBの場合許容範囲内としてマテリアルが黄色に可視化
- BaseColorの輝度値に対してsRGB値が50 (30) ~240の範囲内であればPBRとして適切なマテリアル設定が施されていることとなる

検証データへの適用結果

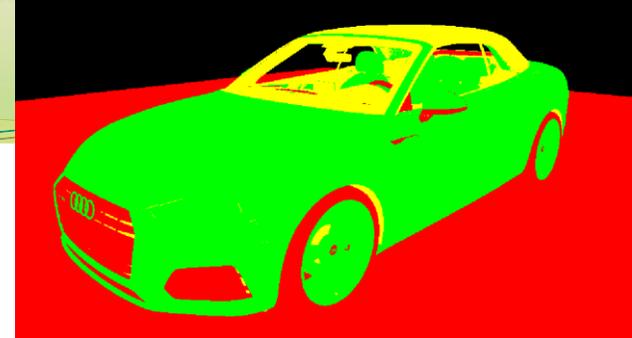
表. モデルA：マテリアルのエラーチェック結果

被験者	グループ	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
被験者1	A	○	○	○	○	×	○	○
被験者2	B	○	○	○	△	△	△	○
被験者3	C	○	○	×	△	△	△	○
被験者4	A	○	○	○	×	×	×	△
被験者5	B	△	○	○	△	△	×	○
被験者6	A	○	○	○	△	△	△	○
被験者7	C	○	○	○	○	×	×	○
被験者8	A	○	○	○	△	△	△	○
被験者9	B	○	○	○	△	△	×	○
被験者10	C	○	○	○	△	△	△	○
被験者11	A	○	○	○	○	△	×	×

表. モデルB：マテリアルのエラーチェック結果

被験者	グループ	①	②	③	④	⑤
被験者1	A	×	○	○	○	×
被験者2	B	△	○	○	○	○
被験者3	C	△	○	○	○	○
被験者4	A	×	○	○	△	○
被験者5	B	○	○	○	○	○
被験者6	A	△	○	○	○	○
被験者7	C	○	○	○	○	○
被験者8	A	△	○	○	○	○
被験者9	B	△	○	○	○	○
被験者10	C	△	○	○	○	○
被験者11	A	○	○	○	△	○

検証結果：PBRエラーチェック



モデルA：Audi A5

- 金属の MATERIAL や布生地に対して比較的どのライティング環境下においてもPBRとして適切な設定が行えている
- 塗装された金属の MATERIAL に関しても適切な設定が施すことができる
- MATERIAL としてプラスチック、ゴムの設定において×が多い
 - プラスチック：2種類の設定があるが黒色に近い設定のため、結果としてエラーとなる設定になってしまったと考えられる
 - ゴム：黒色が強い設定であったことからRGBとして0に近い値で設定してしまった人が多くなってしまった

モデルB：ドローン

- 難しい材質であったが、PBRとしては適切な設定が施すことが可能であった
- 黒色に近い MATERIAL であるほど、PBRとして適切な設定が難しい



どのライティング環境においても、**黒色に近い MATERIAL に対しては PBR としての設定が難しい**ということが分かった

検証結果：直観的なマテリアル設定

アンケートの実施

- グループごとに決められたライティング環境下において直観的なマテリアル設定を行うことができたを確認

TrueHDRIを使用した環境と真っ白な背景の環境でのマテリアル設定の違い

- TrueHDRIのライティング環境
 - 適切な光源環境であることから周囲の環境の反射やHDRIの映り込みにより、反射具合を確認しながら設定を行うことができたという意見が多い
 - ➡ どの程度パラメータの調整を行えば適したマテリアルになるのかを考えるなかで直観的な設定を行うことができた



検証結果：直観的なマテリアル設定

TrueHDRIを使用した環境と真っ白な背景の環境でのマテリアル設定の違い

- 真っ白な背景のライティング環境
 - 周囲の環境の映り込みや反射が無いことにより、特に映り込みを考慮したマテリアル設定が難しく、直観的な設定を行うことが難しい
 - どこから見ても同じ景色であることにより直観的な設定が難しい



周囲の環境の映り込みや反射という要素は、適切な設定を施す上で重要



検証結果：直観的なマテリアル設定

モデルごとに利用するライティング環境の違いによるマテリアル設定の違い

- モデルA：Audi A5
 - 永代橋のライティング環境では、実在するような場所であることから直観的にマテリアルの設定を施すことができた



検証結果：直観的なマテリアル設定

- モデルB：ドローン
 - 東京工科大学の学生：周囲の環境が日常に近いことから実在しないモデルでも具体的に提示された設定をもとにマテリアルの設定がしやすかった
 - ライティング環境によって反射感が分かりづらく感じた
 - 光源が一点に集中しているような感じで、全体を確認しづらかった
 - 反射が強いマテリアルが存在していることや局面が多いモデルであること、東京工科大学内のライティング環境において、太陽の位置が高いところに位置していることが要因ではないか



- 使用するモデルとマテリアル設定の内容によってライティング環境を有効的に使い分けることで、アーティストはマテリアル設定を直観的に行うことができるのではないか
- 太陽の位置などが関わる時間帯の違いによるライティング環境の違い、屋内屋外のライティング環境の違いなども検討する必要がある

検証結果：マテリアル設定の分析

- マテリアル設定におけるパラメータ（数値）を分析
 - 分析方法
 - BaseColorR・G・B、Metallic、Roughness、Specularの6種の数値をグループごとにまとめ分散分析を行う
 - 有意水準 5% (0.05)
 - マテリアルの各パラメータの値において利用するライティング環境の違いによる有意差があるのかを確認（マテリアル設定において数値的に大きな差が起きているのかを確認）

表. モデルA : MI_CarPaint

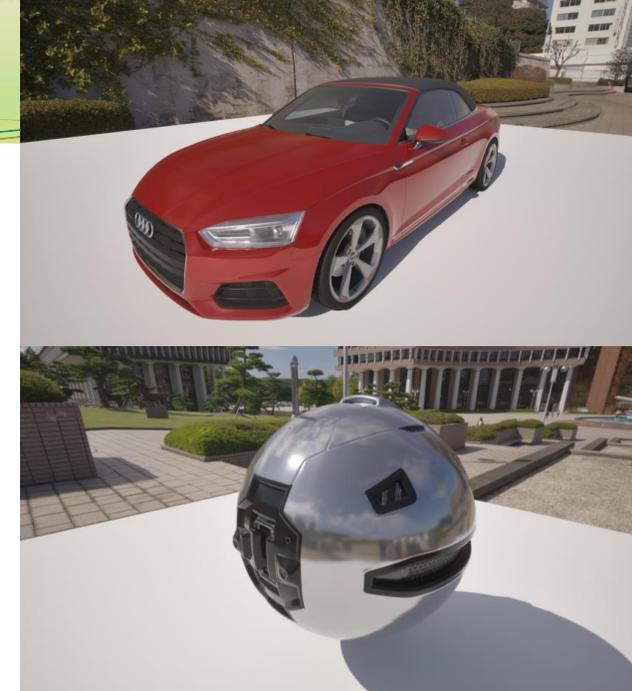
Material_ID	Base_Color_R			Base_Color_G			Base_Color_B			Metallic			Roughness			Specular		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	0.291667	0.541667	0.246201	0.000000	0.000000	0.000607	0.003417	0.000000	0.002732	0.000000	0.760000	0.200000	0.000000	0.106667	0.100000	1.000000	0.309333	1.000000
1	0.239583	0.057292	0.255208	0.002496	0.000000	0.000000	0.002496	0.000657	0.000000	0.136000	0.441501	0.504000	0.000000	0.178299	0.336000	0.192000	0.093394	0.624000
1	0.234551	0.192708	0.234551	0.000000	0.000000	0.000000	0.002428	0.001995	0.002428	0.400000	0.840000	0.660384	0.330000	0.272000	0.295296	0.300000	0.000000	0.380200
1	0.238398			0.000000			0.002428			0.440000			0.001000			0.752000		
1	0.114583			0.000000			0.000000			1.000000			0.136000			0.500000		

表. モデルB : MI_DARK_GREY_METAL

Material_ID	Base_Color_R			Base_Color_G			Base_Color_B			Metallic			Roughness			Specular		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
3	0.070588	0.070360	0.070360	0.070588	0.072272	0.072272	0.070588	0.070360	0.070360	0.628000	1.000000	1.000000	0.088000	0.106667	0.100000	0.440000	0.000000	0.800000
3	0.109462	0.083333	0.072917	0.109462	0.083333	0.072917	0.109462	0.083333	0.072917	0.840000	0.906606	0.850000	0.136000	0.076414	0.100000	0.848000	0.000000	1.000000
3	0.070360	0.070360	0.034340	0.072272	0.072272	0.051269	0.070360	0.070360	0.076185	0.850000	1.000000	0.932077	0.200000	0.176000	0.118865	0.000000	0.000000	0.696213
3	0.070360			0.072272			0.070360			0.760000			0.120000			0.240000		
3	0.035294			0.035294			0.035294			0.832000			0.264000			0.500000		

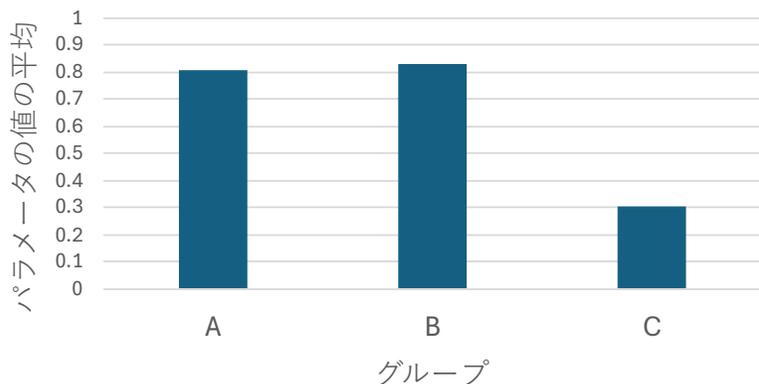
検証結果：マテリアル設定の分析

- 多くのパラメータでグループごとに有意差は見られなかった
- 有意差が見られたパラメータ
 - モデルA：Audi A5
 - MI_Plastic_Glossy（光沢感のある黒色プラスチック）Metallicの値
 - モデルB：ドローン
 - MI_CHROME（クロムパーツ）Specularの値
 - MI_DARK_GREY_METAL（光の反射率80%程の艶あり塗装されたグレーの金属）Metallic、Specularの値
 - MI_GREY_METAL（光の反射率80%程の艶あり塗装された青みのあるグレーの金属） Specularの値

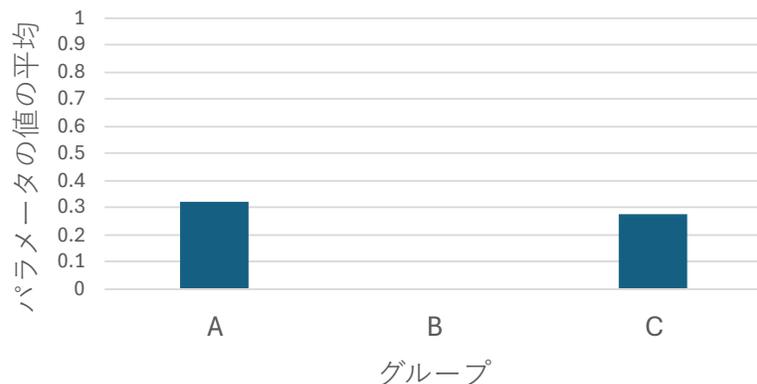


有意差が見られたパラメータの平均値のグラフ例

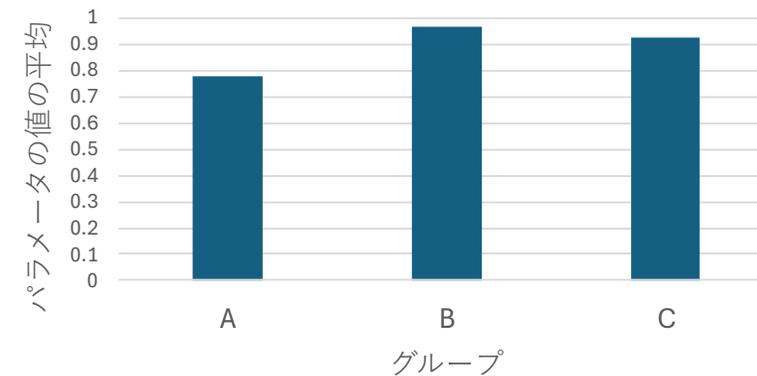
モデルA：MI_Plastic_GlossyのMetallicの値



モデルB：MI_CHROMEのSpecularの値



モデルB：MI_DARK_GREY_METALのMetallicの値



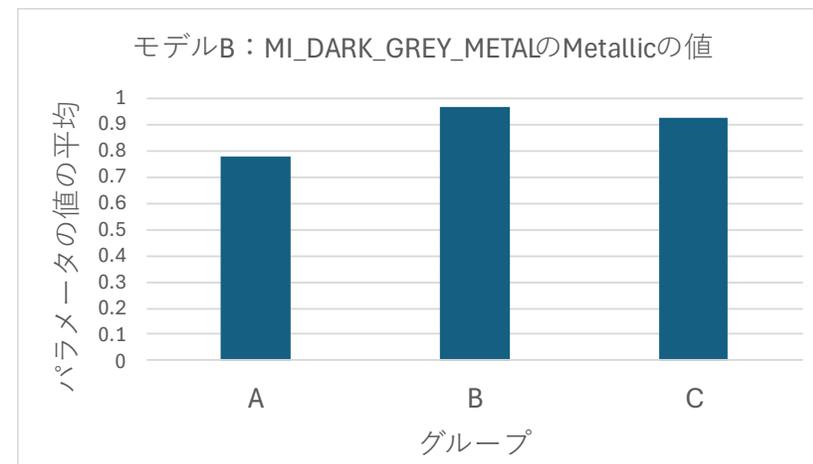
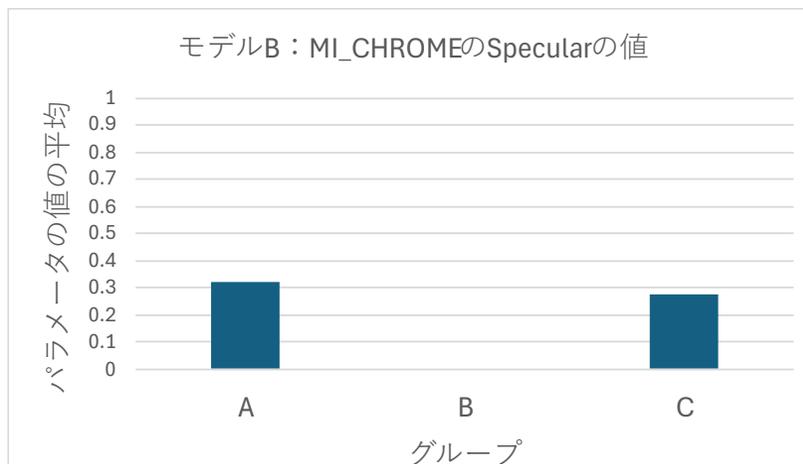
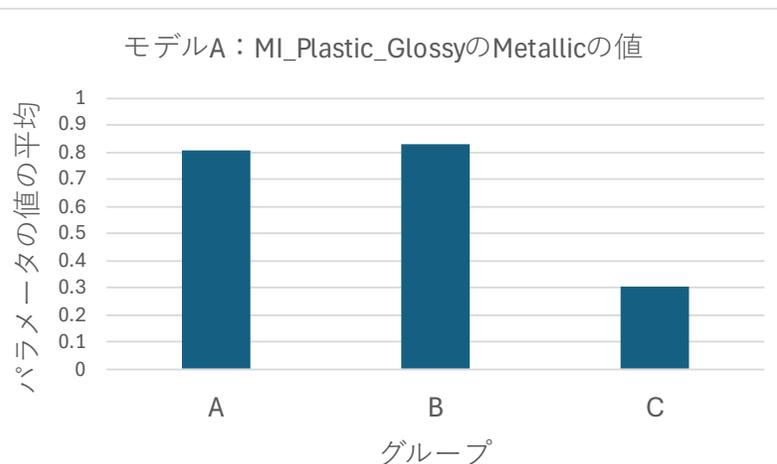
検証結果：マテリアル設定の分析



● 考察

- モデルA：Audi A5における光沢のあるプラスチックの設定
 - 真っ白な背景のライティング環境での設定におけるMetallicの平均値が他に比べ小さい
 - モデルB：ドローンにおけるクロムパーツの設定
 - 真っ白な背景のライティング環境での設定におけるSpecularの平均値が他に比べ小さい
- ➔ 映り込みの要素がない事や適切なライティング環境でないことが要因ではないか
- モデルB：ドローンにおける艶あり塗装されたグレーの金属の設定
 - グループAの東京工科大学のライティング環境での設定におけるMetallicの平均値が他に比べ小さい
- ➔ 設定を行ったライティング環境がモデルBのマテリアル設定に適していなかったのではないか

有意差が見られたパラメータの平均値のグラフ例



まとめ

- ◆ HDRIを用いたルックデブ、ライティング環境を利用したPBR におけるマテリアル設定において、どのようなライティング環境が有効的であるのか検証をもとに検討
- ◆ 検証から得られたこと
 - ◆ PBRマテリアルとしての設定について
 - ◆ 実在する材質だけでなく難しい材質であっても、PBRとして適切な設定が施すことが可能
 - ◆ どのライティング環境においても、黒色に近いマテリアルに対してはPBRとしての設定が難しい
 - ◆ 直観的なマテリアル設定が可能であったかについて
 - ◆ 周囲の環境の映り込みや反射という要素は、適切な設定を施す上で重要である
 - ◆ 使用するモデルとマテリアル設定の内容によってライティング環境を有効的に使い分けることで、アーティストはマテリアル設定を直観的に行うことができるのではないか
 - ◆ 太陽の位置などが関わる時間帯の違いによるライティング環境の違い、屋内屋外のライティング環境の違いなども検討する必要がある

今後の展望

◆ 検証方法の改善

- ◆ 検証では、3つのライティング環境と2つのモデルアセットを利用
- ◆ マテリアル設定の施し方：使用するライティング環境とモデルアセットの組み合わせやアーティストによって変化すると考えられる



- ◆ 用いるライティング環境をより多くする
 - ◆ 反射像の有無、TrueHDRIではない一般的なHDRIを使用した環境の利用
- ◆ より具体的なモデルアセットのマテリアル設定の提示