Vol.2020-CG-178 No.1
2020/6/25

GPU パストレーシングを体験する クラウドベースのコンピュータグラフィックス実習教材

大河原 将[1,a)]　斎藤 英雄[1,b)]　藤代 一成[1,c)]

概要：慶應義塾大学理工学部情報工学科では，2019 年度にカリキュラムを大幅に改定し，学部三年生向けの通年専門科目として「ビジュアルコンピューティング（IA/B，II)」を開講している．この科目では，今日ますます密接な関係にある画像合成と画像センシングおよび画像認識に関して基礎的な事項から先進的なトピックスまでを，系統的かつ統合的に扱っている．さらに，両分野の発展的な内容をテーマとしたプログラミング実習をそれぞれ実施することもその特徴の一つである．2019 年度の CG プログラミング実習では，パストレーシングの理解と GPU コンピューティングの体験を目標とし，鏡面やガラス面の設計に加え，サンプリング数とノイズの関係の考察を課題として出題した．実習教材は，受講者の端末性能の多様性を吸収するためにクラウドベースで作成し，通信環境さえ整えばラップトップ PC やタブレットでも実習が可能となるように工夫した．このスタイルは，新型コロナウイルスの感染拡大によってオンライン講義を余儀なくされている現状に対しても効果的であると考えられる．

1. はじめに

画像合成（CG: Computer Graphics）と画像センシングおよび画像認識（CV: Computer Vision, PR: Pattern Recognition）は今日ますます密接な関係にある．慶應義塾大学理工学部情報工学科では，こうした背景を踏まえて 2019 年度にカリキュラムを大幅に改定し，学部三年生向けの通年専門科目として「ビジュアルコンピューティング（IA/B，II)」（以降，「VC (IA/B, II)」のように表記）を開講している．この科目では，CG と CV/PR に関して基礎的な事項から先進的なトピックスまでを，系統的かつ統合的に扱っている．さらに，両分野の発展的な内容をテーマとしたプログラミング実習をそれぞれ実施することもその特徴の一つである．

2019 年度の CG プログラミング実習では, パストレーシングの理解と GPU コンピューティング（GPGPU：General-Purpose computing on GPU）の体験を目標として設定した．両目標を選択するにあたり，ビジュアルコンピューティング分野を取り巻く技術的背景および技術ロードマップを意識した．そして，これらを達成するために，鏡面やガラス面の設計とサンプリング数とノイズの関係の考察を課題として出題した．

この科目は，100 名程度の受講者を想定して開講されているため，実習環境の選択にも注意する必要があった．受講者の端末性能は多様であり，なかには受講者の端末性能が GPGPU に耐えられないことも考えられる．そこで，Google Colaboratory (Colab) [2] を用いてクラウドベースで実習教材を作成することにより，受講者の端末性能の多様性を吸収することを試みた．Colab は，Web ブラウザ上で動作する対話型実行環境であり，最新の GPU を無料で使用することができる．Colab 上で実習教材を作成することにより，通信環境さえ整えばラップトップ PC やタブレットでも GPU パストレーシングの体験が可能となる．このスタイルは，新型コロナウイルスの感染拡大によってオンライン講義を余儀なくされている現状に対しても効果的であると考えられる．

次節では，まず「VC (IA/B，II)」の科目概要を紹介する．3 節では，CG プログラミング実習のねらいについて詳述する．4 節では，実習教材のシステム概要を図解し，その利点と欠点に言及する．5 節では，実習内容を俯瞰する．6 節では，実習教材および CG プログラミング実習について多角的かつ客観的に評価する．7 節では，実践報告としてのまとめを述べるとともに，次年度以降の展望を示す．

2. 「VC (IA/B，II)」の科目概要

慶應義塾大学理工学部情報工学科では，これまで学部 3/4 年次向けに秋学期の選択専門科目として，CV/PR 系

1 慶應義塾大学
a) masaru.ohkawara@fj.ics.keio.ac.jp
b) saito@hvrl.ics.keio.ac.jp
c) fuji@fj.ics.keio.ac.jp

© 2020 Information Processing Society of Japan

表 1: 「VC (IA/B，II)」の講義内容
* は CG 系の担当回，下線は実習回を示す

VC IA/B	VC II
(IA01) オリエンテーション	(II01) シェーディングの基本 *
(IA02) ラスタグラフィックスアーキテクチャとカラーモデル *	(II02) 明るさ解析による三次元形状推定
(IA03) 画像の濃度変換とフィルタリング	(II03) 図形の検出・特徴点検出
(IA04) ラスタ変換とアンチエイリアシング *	(II04) テクスチャの合成とマッピング *
(IA05) 画像の周波数とその利用法	(II05) 画像とパターン認識
(IA06) 二次元同次座標系と幾何学的変換，クリッピング処理 *	(II06) 大域照明モデル*
(IA07) 画像の幾何学的変換の応用例	(II07) アニメーション *
(IA08) IA 試験	(II08) 動画像処理・画像の符号化
(IB01) 自由曲線と自由曲面*	(II09) 画像の領域分割
(IB02) ソリッドモデルによる立体の表現 – CSG と境界表現 *	(II10) CV プログラミング
(IB03) その他の立体表現，三次元幾何学的変換，四元数表現 *	(II11) CG プログラミング*
(IB04) 合成カメラモデルとビューイング，ハイブリッド座標系 *	(II12) イメージベース・モデリング&レンダリング *
(IB05) カメラキャリブレーション	(II13) 多視点画像による三次元センシング
(IB06) 画像による三次元センシング	(II14) 可視化入門 *
(IB07) 隠面消去 – 背面消去法，Z バッファ法，レイキャスティング法 *	(II15) 期末試験
(IB08) IB 試験	

の「映像情報メディア工学」（担当：斎藤，2 単位）と CG 系の「コンピュータグラフィックス」（担当：藤代，2 単位）を開講してきた．2019 年度からの学科全体に及ぶ大幅なカリキュラム改定にあたり，両者を統合し，共同担当による「VC IA/B」（春学期，各 1 単位）と「VC II」（秋学期，2 単位）を開講することになった．A/B は夏期の海外留学可能性を高めるクォーター制に対応して，半期をさらに二分割したものである．また，「VC IA/B」は，同学部数理科学科向けに「図形処理 A/B」という名称でも開講している．

表 1 に 2019 年度の講義内容を示す．IA は二次元処理，IB は三次元処理の基本的事項に徹し，II でより先進的なトピックスも取り扱う流れになっている．CV/PR 系，CG 系の内容を相互参照する受講者の便宜を考慮して，両者の担当回がバランスよく配列されていることがわかる．情報工学科では別途，春学期の必修実験科目「情報工学実験第一」で，CV/PR 系の実験テーマ「立体形状キャプチャ」と CG 系の実験テーマ「POV-Ray を用いた CG モデリング」も履修させている関係もあり，本 2 科目は座学中心である．ティーチングアシスタント（TA）は両科目を通じて CV/PR 系，CG 系各 1 名を配備し，本稿の筆頭著者である大河原は，2019 年度の CG 系 TA を務めた．次節以降で報告する CG 系プログラミング実習は，CV/PR 系プログラミング実習に続いて，秋学期 II の 11 回目に実施されている．なお，本学大学院理工学研究科情報工学専修では，「コンピュータビジョン」（斎藤）と「コンピュータ可視化特論」（藤代）が春学期に英語で開講されており，8 割を超える大学院進学者は，希望すれば 4 年次に先行履修することも可能である．その場合は 1.5 年間で計 4 科目のビジュアルコンピューティング科目と実験科目 1 科目を受講できることになる．

受講者には，毎回独自のハンドアウトを配布するものの，両科目を通じて，標準的教科書として藤代，斎藤も編集・執筆に携わった，CG-ARTS 編のテキスト 3 冊 [7–9] を指定した．本研究会では，CG 系テキスト [7] の編纂や背景にあるカリキュラムの設計方針について，既に [10] でも報告しており，本科目はその講義実践の一例と位置づけることができる．

2019 年度の履修申告者は，IA：90 名（情報 72 名，数理，他：18 名），IB：80 名（情報：64 名，数理，他：16 名），II：65 名（情報のみ）であった．受講者の学習到達度を測るために，有志に CG-ARTS 検定エンジアリング系エキスパートを団体受験させた．前期（実施：7 月 14 日）は IB5 後，後期（実施：11 月 24 日）は II7 の実施直後であり，各々開講の途中での受験にもかかわらず，延べ 19 名中 16 名が合格，うち 5 名は CG エンジニア/画像処理エンジニア検定の両方に合格した．特に後期の受験者は延べ 10 名全員が合格し，2019 年度認定教育校優秀校（エキスパート合格率部門）を受賞した．優秀校表彰は，カリキュラム改正前の 2013 年度から 7 年連続である．

3. 実習のねらい

2019 年度の CG プログラミング実習では，パストレーシングの理解と GPGPU の体験を目標として設定した．ここでは，その選択理由について説明する．

3.1 パストレーシング

パストレーシング [3] は，1986 年に発表されて以来，さまざまな拡張がなされて現在に至る．映像業界などで使用される多くのレンダラはパストレーシングをベースアルゴリズムに採用しており，私たちが普段目にする写実性の高い CG のほとんどはパストレーシングによって生成されていると言っても言い過ぎではない．

2018 年，Nvidia は GeForce RTX シリーズ GPU の発売を開始し，リアルタイムレイトレーシングという技術革新をゲーム業界にもたらした．それまで，ゲーミンググラフィックスでは，ラスタリゼーションが主流であり，計算

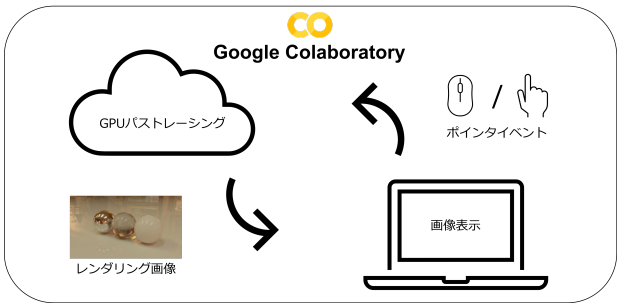


図 1: 実習教材のシステム概要

負荷の高いレイトレーシング系アルゴリズムは使用できないとされていた．また，Nvidia は “2035 年までにゲーム業界は全面的にパストレーシングベースに移行する” という技術ロードマップも示している [4]．求める品質やインタラクティブ性の違いによって，それぞれの技術革新の道を歩んできた映像業界とゲーム業界であるが，今後レンダリングという観点で両者は統合されていくという未来像を示している．このように，レンダリングの新しいパラダイムとなりつつあるパストレーシングを理解することは，CG 分野を鳥瞰する一助になると期待できる．

3.2 GPGPU

ビジュアルコンピューティング分野全体の流れとして，GPGPU の進化がもたらした影響はひじょうに大きい．CG 分野では，アニメーションやレンダリングに適用され，インタラクティブ性の飛躍的な向上につながった．CV/PR 分野では，GPU による深層学習の性能向上に伴い，高速かつ高精度な物体検出や高度なシーン推定が可能となった．そして，今後も GPGPU がビジュアルコンピューティング分野の技術革新を支えていく可能性は高いと考えられる．2019 年度は，GPU パストレーシングと深層学習を各分野の実習で体験できるように設計した．このように，ビジュアルコンピューティング分野の技術革新の起爆剤となっている GPGPU を体験することは情報工学系大学生にとって有意義であると考えられる．

4. 実習教材の特徴

4.1 システム概要

実習教材のシステムは，クラウドと端末がインタラクティブに通信することによって構成される（図 1）．なお，クラウドと端末間の通信は Colab で完結する．クラウドでは，OpenGL を使用した GPU パストレーシングが実行される．はじめに，OpenGL を初期化し，Web サイト（HDRI Haven [6]）からライティング用の環境マップをダウンロードしてシーンを構築する．次に，クラウドと端末の間でレンダリングループを形成し実行を開始する．クラウドは，ポインタイベントを端末から受信し，それに基づいてカメラパラメタを変更してからシーンをレンダリングし，その画像を端末へ送信する．端末は，クラウドから受信したレンダリング画像を表示し，ポインタイベントをクラウドへ送信する．クラウドは，ポインタイベントが発生しない限りサンプリングを継続し，ポインタイベントが発生したタイミングで総サンプリング数を 0 にリセットしてサンプリングを再開する．

クラウドでのレンダリングフローを説明する．まず，レンダリング画像を表示するためのキャンバスの役割を担う四角のポリゴンを定義する．このポリゴンは，Vertex Shader からラスタライザを経て Fragment Shader に渡り，Compute Shader で生成される画像のテクスチャマッピングにより着色される．なお，Compute Shader は GPGPU のために用意されたシェーダであり，パストレーシングのような光伝播シミュレーションも可能である．

4.2 利点と欠点

実習教材の利点と欠点をそれぞれ二つ採り上げる．

一つ目の利点は，Web ブラウザで完結する点である．これは Colab の特長とも言える．“Colab は，ほとんどの主要なブラウザで動作し，最新バージョンの Chrome，Firefox，Safari で特に徹底したテストが実施されている” [1]．本稿執筆時点で，Chrome version 81.0.4044.138 と Firefox version 76.0.1 で動作確認済みである．また，Colab でプログラムを実行するにあたり，Web ブラウザ以外のソフトウェアを端末にインストールしたり面倒な環境構築を行ったりする必要がない．実習教材は Colab で実行可能なプログラムであり，こうした特長を継承している．このため，限られた時間でも実習教材を導入することができ，簡単に実習を開始することができる．

二つ目の利点は，高性能端末が不要という点である．Web プラウザで GPU パストレーシングを実現するための他の選択肢として WebGL を利用する方法がある．しかし，WebGL は端末の GPU を使用するため，端末への性能要求は大きくなってしまう．一方，実習教材では，クラウドの GPU が使用されており，端末にかかる主な負荷は画像の受信および表示に限定されている．そのため，端末への性能要求は限りなく小さくなり，多くのラップトップ PC やタブレットでの動作が可能となっている．

一方で，一つ目の欠点は，通信環境が必須という点である．Colab にはローカルランタイムモードが用意されており，これに切り替えることで通信環境が無くとも実習教材を使用することは可能である．しかし，ローカルランタイムで実行するには，適切な環境構築や性能要求を満たす GPU を搭載した端末が必要であるため，実習教材のもつ本来の利点を活かすことができなくなる．幸いにも，新型コロナウイルスの感染拡大の影響で今後ますます通信環境の整備が進むと考えられるため，これは重大な欠点とはならないと考えられる．

© 2020 Information Processing Society of Japan

表 2: CG 実習講義内容

トピック	詳細
OpenGL の基礎知識および描画パイプライン	Vertex Shader と Fragment Shader によってベクトルデータから画像が描画される流れを説明した．さらに，汎用計算の一つであるパストレーシングが GPU 上で実現される仕組みについて Compute Shader に触れて解説した．
パストレーシングアルゴリズム概要	レンダリング方程式とそれを数値的に解くための手法の一つであるモンテカルロ法について説明し，パストレーシングの疑似的な計算ステップを紹介した．
レイキャスティング	パストレーシングの最初のステップとして，カメラからスクリーンへ向かう光線の生成方法を解説した．ここでは，簡単のためにピンホールカメラモデルを想定した．
球と光線の衝突判定	追跡中の光線と球の衝突判定について解説した．
完全拡散反射面	球に衝突した光線が次に辿るパスを設定するためにマテリアルを導入し，その一例として完全拡散反射面を解説した．
トーンマッピング	実習教材では，High Dynamic Range Image (HDRI) の環境マップを光源として使用する．したがって，レンダリング結果も HDRI となるため，画像表示の際には Low Dynamic Range Image (LDRI) への変換が必要となる．そこで，HDRI を LDRI に変換するためのトーンマッピングの一手法 [5] を紹介し，その効果を図示した．
イメージベーストライティング	環境マップによってシーンをライティングするイメージベーストライティングを解説した．

図 2: 実習教材の初期実行で得られる画像

二つ目の欠点は，通信による遅延である．レンダリングループがクラウドと端末の間で形成されているため，ローカルランタイムと比較すると大きな遅延が発生してしまう．しかし，実習教材はゲームのようなリアルタイム性を求められるものではないため，通信による遅延は許容範囲内であると考えられる．

5. 実習内容

5.1 講義内容

実習教材は OpenGL の基礎知識からパストレーシングの一連の流れまでを取り扱う．実習教材の導入にあたっては，専用の講義時間を 1 時限分設けた．本節における講義とは，その専用講義のことを表す．表 2 に 2019 年度における講義内容を示す．なお，講義は実習教材を全員で動作させ，図 2 に示す画像がレンダリングされることを確認してから開始し，受講者が自ら実行しながら聴講できるようハンズオン形式をとった．

5.2 課題内容

講義の終わりに，以下で述べる 2 種類の課題を提示し，約 1 か月半の実習期間を設けた．なお，この実習期間は基本的に自宅での実習とした．

5.2.1 鏡面やガラスの設計

この課題では，実装済みの完全拡散反射面を参考に，鏡面やガラス面を設計する．正しく設計することで，図 2 から図 3 のように外観が劇的に変化する様子を確認することができる．特に，ガラス面については，大域照明効果の一つであるコースティクスも確認することができる．

(a) 鏡面

(b) ガラス面

図 3: 鏡面およびガラスの設計

5.2.2 サンプリング数とノイズの関係

この課題では，サンプリング数を変化させた際にノイズがどのように変化するかを定量的に評価・考察する．受講者は実習教材を使って取得した図 4 のような画像を使用して，Root Mean Squared Error によってノイズを定量化し，グラフにプロットして近似曲線を得る．そして，得られた近似曲線の係数について，理論値と比較し考察する．さらに，このノイズを低減する方法も調査する．

© 2020 Information Processing Society of Japan

(a) 16 サンプル/ピクセル

(b) 64 サンプル/ピクセル

(c) 256 サンプル/ピクセル

(d) 1,024 サンプル/ピクセル

図 4: サンプリング数とノイズの関係

6. 評価

6.1 所見

講師の観点から実習内容の定着度と実習教材がクラウドベースであることによる特長を評価する．

6.1.1 定着度

レポートの得点から実習内容の定着度を評価する．ここで，鏡面の設計，ガラス面の設計，サンプリング数とノイズの関係をそれぞれ課題 1，課題 2，課題 3 とする．また，課題 1 と課題 2 は 6 点，課題 3 は 8 点を満点とした．図 5 は 2019 年度の課題提出者 35 名の得点分布を表している．課題 1 については 97%以上，課題 2 については 88%以上の課題提出者が満点を獲得している．課題 3 については，中央値が 4 点で，80%の課題提出者が 4 点以上を獲得している．課題 1-3 の合計点は，中央値が 16 点で 74%以上の課題提出者が 16 点以上を獲得している．以上のデータから，課題 1 と課題 2 については多くの受講者が理解しており，課題 3 については受講者の間で理解度のばらつきが大きいということが言える．この原因として，課題 1 と課題 2 については十分な導入があった一方で，課題 3 については導入が不十分であったからであると考えられる．

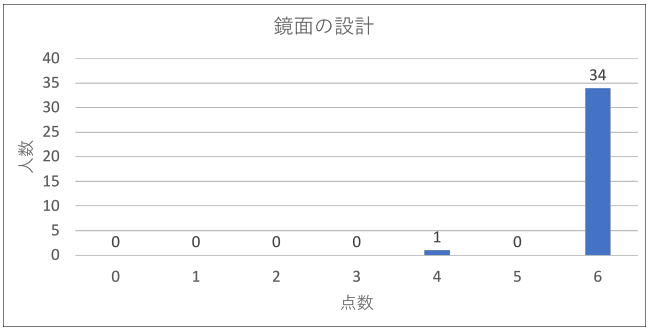
6.1.2 クラウドベースであることによる特長

図 6 はタブレットで実習教材を動作させている様子である．通信環境さえあれば，このようにタブレットでも実習教材を使用することができる．なお，図 6 の端末には Qualcomm Adreno 330 GPU が搭載されている．この GPU は，2013 年時点における Android ベース System on Chip 向けハイエンド GPU であり，決してパストレーシングに耐えられる性能とは言えない．こうした端末でも動作確認できることから，受講生の端末性能の多様性を吸収する効果は実際高かったと言える．

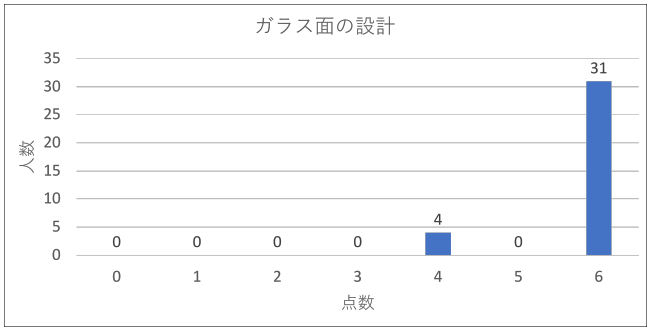
6.2 受講者から寄せられた意見

受講者から寄せられた意見を二つ紹介する．一つ目は，実習教材の説明が不足しており，課題に取り組むうえで悪影響を及ぼしているという意見である．特に，ソースコードにコメントが少ないことが理解の妨げになっているとのことである．これは，受講者が自立して課題に取り組めるようにするために改善が必要な点である．今後，ソースコードにコメントを追加したり，ドキュメントを別途用意したりするなどの工夫を検討している．二つ目は，より深い内容を学習したいという意見である．実習教材はビジュアルコンピューティング以外の分野に進む学生もターゲットとしているため，一部の受講者からより深い内容を学習したいという意見が出るのは驚きではない．このような受講者がより発展的な知識を得るための道筋を示すコンテンツの追加も検討している．

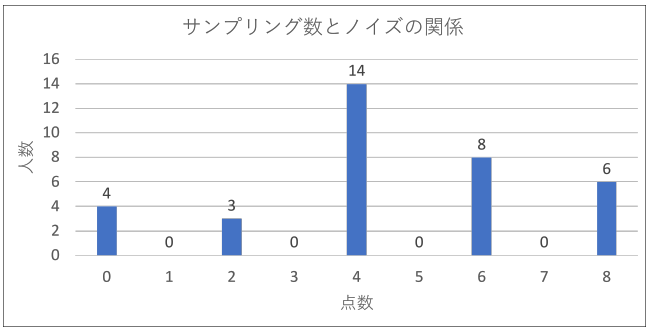
© 2020 Information Processing Society of Japan



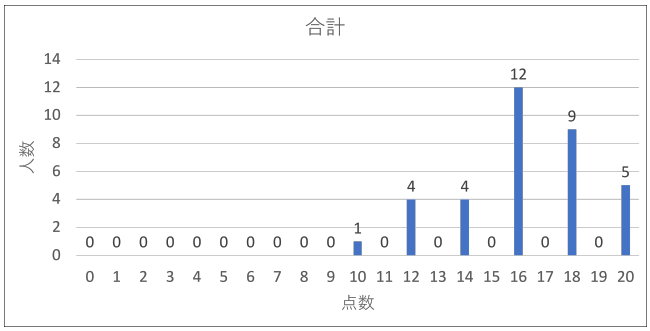
(a) 課題 1



(b) 課題 2



(c) 課題 3



(d) 合計

図 5: 課題の得点分布

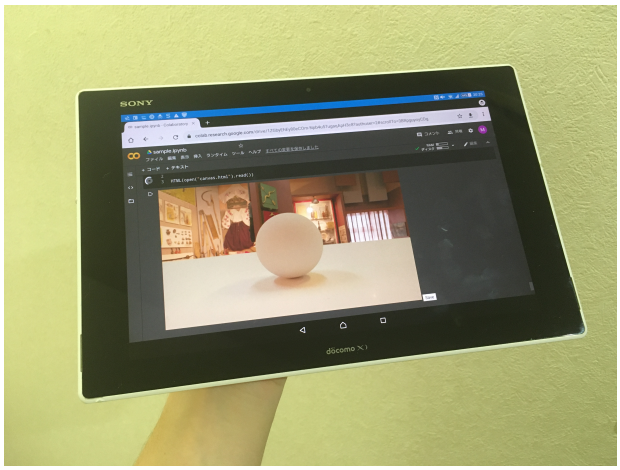


図 6: タブレットでの実習教材の動作確認

7. おわりに

GPU パストレーシングを体験するクラウドベースのコンピュータグラフィックス実習教材を実践報告とともに紹介した．課題の得点分布から，教材としての使用が可能であると評価することができる．しかし，補助的要素の追加など改善の余地はある．また，2019 年度を終えて，実習講義内容の一部を通常講義に移行することで，両者のさらなる連携強化が期待できることも発見した．

実習教材は，クラウドベースという特長を活かして，ラップトップ PC やタブレットでも高負荷な演算を含む実習を可能としている．このスタイルは，新型コロナウイルスの感染拡大によってオンライン講義を余儀なくされている現状に対しても効果的であると考えられる．今後，オンライン実習の活発化に合わせて実習教材も改善していく必要がある．

参考文献

[1] Google: Colaboratory – Google, https://research.google.com/colaboratory/faq.html (2020-06-01).
[2] Google: Welcome To Colaboratory - Colaboratory, https://colab.research.google.com/notebooks/intro.ipynb (2020-06-01).
[3] Kajiya J. T.: The Rendering Equation, In *Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '86, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 143–150 (online), DOI: 10.1145/15922.15902 (1986).
[4] Keller A., Viitanen T., Barré-Brisebois C., Schied C. and McGuire M.: Are We Done with Ray Tracing?, In *ACM SIGGRAPH 2019 Courses*, SIGGRAPH '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3305366.3329896 (2019).
[5] Reinhard E., Stark M., Shirley P. and Ferwerda J.: Photographic Tone Reproduction for Digital Images, In *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '02, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 267–276 (online), DOI: 10.1145/566570.566575 (2002).
[6] Zaal G.: HDRI Haven, https://hdrihaven.com/ (2020-06-01).
[7] 画像情報教育振興協会編：改訂新版コンピュータグラフィックス (2015).
[8] 画像情報教育振興協会編：改訂新版ディジタル画像処理 (2015).
[9] 画像情報教育振興協会編：改訂新版ビジュアル情報処理—CG・画像処理入門— (2017).
[10] 藤代一成, 斎藤隆文, 乃万司, 高橋成雄, 馬場雅志, 宮田一乗：<<改訂新版コンピュータグラフィックス>>の狙い, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-CG-158, No. 6 (2015).

© 2020 Information Processing Society of Japan