

ユーザ行動モデルに基づく Time Critical Rendering

田中 利果 藤代 一成[†] 丸山 知子[‡]

お茶の水女子大学 大学院 理学研究科 情報科学専攻

[†]お茶の水女子大学 理学部 情報科学科

〒112 東京都文京区大塚 2-1-1

{rika, fuji}@is.ocha.ac.jp

[‡]凸版印刷 マルチメディア事業部

近年, Time Critical Rendering(TCR) に大きな注目が寄せられている. TCR とはフレームレートの維持を目的として適応的にレンダリングの質を制御しようという考え方であり, 対話性が重視される没入的バーチャルリアリティ (VR) 環境においては特に重要な役割を果たすことが期待されている.

本論文では, よりレベルの高い TCR 環境を目指して, 本研究会第 79 回 (1996 年 2 月)[3] で発表したインテリア空間評価における人間の行動モデルを, 詳細なユーザ行動分析に基づいて拡張する. さらに, 画像ベースレンダリングにおいて, ユーザに気づかれにくいテクスチャの LoD(解像度) 制御の方式について検討する.

Time Critical Rendering based on a participant behavior model

Rika Tanaka, Issei Fujishiro[†] and Tomoko Maruyama[‡]

Department of Information Sciences, Ochanomizu University

2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112, Japan

{rika, fuji}@is.ocha.ac.jp

[‡]Mutlimadea Division Toppan Printing, Co., Ltd.

Tokyo 110, Japan

Time Critical Rendering (TCR) has recently attracted much attention in VR-related communities. TCR is a concept that time-indulgent pursuit of high-quality rendering should be traded for allowing direct control over the timing of rendering according to variable frame rates required for participant interactions, and is expected to play an elementary role in creating immersive virtual environments where responsive interactivity is most crucial.

This paper underlies a detailed analysis of human interior evaluation to extend the user behavior model in interior simulation, which was presented at *the 79th IPSJ SIGCG workshop* (February 1996)[3]. Furthermore, the effectiveness of a new human-insensitive method for controlling LoDs of textures used in image-based VR systems is discussed.

1 はじめに

近年、バーチャルリアリティ (VR) など、対話性が重視される CG アプリケーションが増えてきている。そのようなアプリケーションにおいては、描画の遅れは致命的であり、フォトリアリティ追求の CG とは違った問題を抱えている。そこで最近、必要なフレームレートを得るためには画像のクオリティを落そうという考え方である Time Critical Rendering (TCR)[11][12] が注目を集めている。本来必要とされるフレームレートは、アプリケーションの性質、更にはユーザのその時々の要求によって変化するものである。そこで、我々はこれをアプリケーションとユーザの対話の中から決定すべきだと考えてきた [3][2][5]。具体例として、インテリアシミュレーションにおけるユーザの行動モデルを開発し、ユーザがどのようにインテリア空間を評価しようとしているのかを追跡することによって、フレームレートと画質の間のトレードオフの解消に資することの可能性を試みてきた。しかし、現行の行動モデルはまだあいまいさを多く含み、フレームレートと画質の適応的な制御に充分であるとは言えない。そこで本論文では、その行動モデルを、より詳細なユーザの行動分析に基づいて拡張する。

次節でまず TCC 適用の多階層性について述べ、続く第3節で文献 [3] のインテリアシミュレーションにおける行動モデルを紹介し、その問題点を解消する拡張を提案する。また、第4節で新しい行動モデルに基づく拡張的 LOD 制御法に触れ、最終節で今後の課題と展望を述べる。

2 TCC の多階層性

TCR の上位概念として Time Critical Computing(TCC) が知られている [11][12]。TCC とは「迅速な処理のためには計算の質を落すこともやむを得ない」とする考え方である。その利用効果は多くの分野で顕著に現れる [13]。例えば、マルチメディア処理では同期の確保のために、またデータビジュアライゼーションにおいてはパラメータ値の変化に即応した対話的探究環境の実現のために、さらに VR においては特に没入感の維持のために、それぞれ重要な役割を果たすと考えられている。

TCC が適用できる3つの layer が考えられる。ここではそれぞれを Infrastructure layer, Modeling/rendering layer, Application layer と呼ぶ (図1)。なお、図中の QoS (Quality of Service) は、広義の「サービスの質」の意味で用いている。

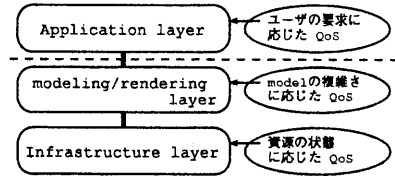


図1: TCC の多階層性

<Infrastructure layer>

ジョブの複雑さや、CPU・ネットワークの計算負荷のダイナミズムによる処理時間の変動への影響を最小限にするため、ハードウェア / システムプログラミングレベルで TCC を行なう。

一定の処理時間を保証するために計算の近似レベルを変更する他、OS によるジョブ管理、利用可能な計算資源を効率的に利用したタスクのリスケジューリングによる制御も考えられる。

<Modeling/Rendering layer>

描画するシーンの複雑さなどの影響を最小限にして、目的とする均一なフレームレートを得るために、モデル / レンダリング法の LOD 制御により、画質を適応的に調節する [6]。「モデルのレベル / レンダリング法と処理時間」と「モデルのレベル / レンダリング法と生成画像の質」を推定する、計算量 / 画質モデルの完成度が TCR の効果を大きく左右する。シーンの複雑さなどに応じて形状モデルとレンダリングアルゴリズムをうまく選択した上で、さらに許される計算資源と時間内において progressive refinement を実行する方針が一般的である [13]。

<Application layer>

アプリケーションがユーザに提供する QoS を適応的に変更する。TCR においては、ユーザにできるだけ気づかせないよう画質を落とすことがその目的であり、フレームレートと画質の間のトレードオフを解消する折衷点を決定することが肝要である。この layer が唯一ユーザとコンピュータとのインターフェースとなる部分である。

先行研究における、インテリア評価のためのユーザ行動モデルを用いた画質制御は、最上位の Application layer における TCR アプローチと位置づけることができる。

3 ユーザ行動モデル

3.1 インテリア評価の実際

効果的なインテリアシミュレーション環境を作成する上で、人間はインテリア空間の快適さをどのように評価しているかを理解することは重要である。

インテリア空間における快適さの評価基準として、心理学的基準と人間工学的基準の2つの評価軸があることが知られている [1]。心理学的基準とは主に、スケール感覚やオブジェクトの色・テクスチャの評価に関わるもので、一方人間工学的基準とは、人体寸法や動作空間の評価に関わるものである。人間は両者を巧みに組み合わせることによって、設計された空間の良否を総合的に判断している。

ここで、ユーザがインテリア空間の心地よさを心理学的基準で評価している状態を心理学的モード、人間工学的基準で評価しようとしている状態を人間工学的モードとそれぞれ呼び、双方を合わせて評価モードと呼ぶことにする。

VR を用いてこのような評価ができるような仮想インテリア空間を構築することを考える。オブジェクトの色や素材感の快適さなどの心理学尺度での評価を可能にするためには、フォトリアスティックレンダリングを重視する必要があるのに対し、空間の使いやすさといった人間工学的基準で評価をさせるためには、ユーザが効率的に空間を動き回るのに十分なフレームレートを確保する必要がある。よって両者を満足させるためには、各時点でのユーザの評価モードをシステム側が感知して、画質とフレームレートの適応的な制御を行なうべきである。

3.2 先行ユーザ行動モデル

文献 [3] ではその第一歩として、インテリアシミュレーションにおけるユーザの行動をモデル化し、Application layer で TCR を実現することを試みた。視点 (viewpoint) を、仮想空間におけるユーザの「位置」、注視点 (gaze) を見ている「対象」の位置とする。ここでは簡単のために視線方向の注視の深さ (焦点) は無視することにし、視線ベクトル上で視点に最も近いオブジェクト上に注視点を定めることにする。ここで、視点の速度を v 、注視点の速度を g とし、それぞれ $v < \epsilon$, $g < \epsilon$ (ϵ は充分 0 に近い正数) を「静止」している状態、それ以外を「移動」している状態とする。視点と注視点の動きの状態の組合せから、合計で 4 つの基本状態を考えられる。それぞれの状態を State(0) ~ State(3) と表記することにする。

現行モデルは図 2 に示すように、2モード4状態のハイパーグラフモデルとなる [2]。心理学的モードにある場合、一般にユーザは注視点の移動を控えるという観点から、主に注視点が静止している State(2)、State(3) にあるとし、一方人間工学的モードにある場合は、ユーザは通常空間内を移動するという観点から、主として State(1)、State(3) にあるとしている。また、State(0)、State(3) は両方の評価モードに属するとしていた。

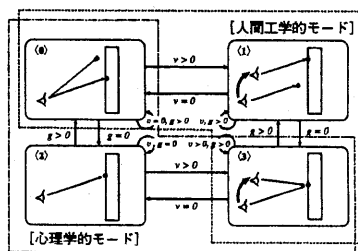


図 2: ユーザの評価モード遷移図

- State(0): 【視点】静止, 【注視点】移動
- State(1): 【視点】移動, 【注視点】移動
- State(2): 【視点】静止, 【注視点】静止
- State(3): 【視点】移動, 【注視点】静止

しかしながら、この行動モデルには以下のような2つの問題点が指摘できる:

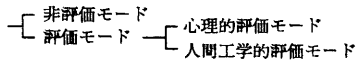
- A) ユーザがインテリア空間の心地よさを評価している状態しか扱っていないが、特に評価を行っていない状態も考慮すべきである。
- B) State(0)、State(3) ではユーザがどのモードに属しているか判断できず、フレームレートや画質を効果的に決定することができない。

そこで次項では両者の問題点を解決するような拡張モデルを提案する。

3.3 拡張行動モデル

まず、問題点 A) について考える。一般に、焦点がシーン内の可視状態にあるオブジェクトに合っていないとき空間の評価は行なっていないと考えられる。先の評価モードに対して、この場合を非評価モードと定義し、区別する。ここで、注視点の定義を、3次元位置 (深さ) を含めた本来の意味に戻す。ユーザの両眼の視線方向から注視点の3次元位置をトレースす

るデバイスが、現在利用可能になっていることから、この情報は可観測である。非評価モードは、視点も注視点も固定した状態 State(2) の特別な場合であると考えられることから、ハイパーグラフは以下のように3モードに拡張されるべきである。



次に問題点 B) を解決するために、今度は「視点の動きの方向」というもう1つの指標を設けることにする。これによって State(3) をさらに分化し、ユーザの評価モードを割り当てる。

State(3) において視線方向上 (視点と注視点を結ぶ直線上) に、ユーザの2通りの動きを考える：

< 注視物体に近づく >

オブジェクトをより詳細に観察しようとする行為であると捉えることができ、心理学的モードに属していると考ええる。

< 注視物体から遠ざかる >

注視しているオブジェクトをより広い視野から眺めようとする行為であると捉えることができ、人間工学的モードに属していると考ええる。

隣接フレーム間の視点位置をチェックすることにより、これらの動きも容易に観測することができる。

以上の拡張により、図3に示すような3モード7状態ハイパーグラフ [2] を得る。以下、この拡張による利点をまとめる：

- ユーザ行動モデルが2モードから3モードに拡張され、ユーザの行動観察に基づく要求解析を細粒化することができた。
- 「視点の方向」という指標を導入することによって、あいまいであった State(3) における制御性が高まった。

State(0) の詳述化は今後の課題である。

4 適応的テクスチャマッピングの拡張

4.1 TCR の実現方式

TCR の実現法として、以下の3方式が考えられる：

1. Image-based rendering[8][7]
2. Geometry-based rendering[6][13]
3. 方式1と2の混合による Hybrid rendering[4]

テクスチャを用いる利点は、テクスチャ自身比較的大きな記憶域を必要とするものの、空間およびその中のオブジェクトをすべて多面体で表現し、3次元レンダリングを施してフォトリアリティを実現する方式と比較すれば、時空間の両面に渡って効率的であることである。また、描画時間がシーンの複雑さに原則として影響を与えないことも有利な点である [8]。

しかし仮想環境との対話性、例えばドアの開閉、そこからの出入りなどを考えた場合、Image-based rendering だけに頼ることは基本的に不可能であり、Hybrid rendering が不可欠となる。文献 [3][2][5] でもインテリア空間のスケルトンをジオメトリで、そのディテールをテクスチャでそれぞれ表現する Hybrid rendering を用いて TCR を実現してきた。そこで以下ではテクスチャの LoD 制御に焦点を合わせることにする。

4.2 先行研究における LOD 制御

画像ベースの VR において TCR を実現するためのテクスチャデータ構造としてピラミッド構造を導入する。ピラミッド構造とは、図4に示すように、与えられた $2^n \times 2^n$ の原テクスチャ画像に対して、解像度の異なる $2^0 \times 2^0 \sim 2^n \times 2^n$ の $n+1$ 枚のテクスチャ画像を生成したものである。

先行研究 [3] では、以下 4.2.1 項～4.2.4 項の4つのパラメータでピラミッド内のテクスチャレベルを決定していた。

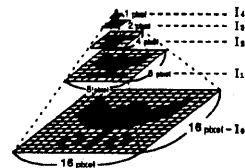


図4: ピラミッド画像の例 ($n=4$)

4.2.1 オブジェクト-視点間距離による LOD 制御

シーン内の各可視オブジェクトごとにテクスチャの解像度を、視点からの距離に反比例して低くする。

4.2.2 視点の速度による LOD 制御

視点が動いているときは、その速度の大きさにかかわらず、シーン内のすべての可視オブジェクトのテクスチャの解像度を一段階下げる。

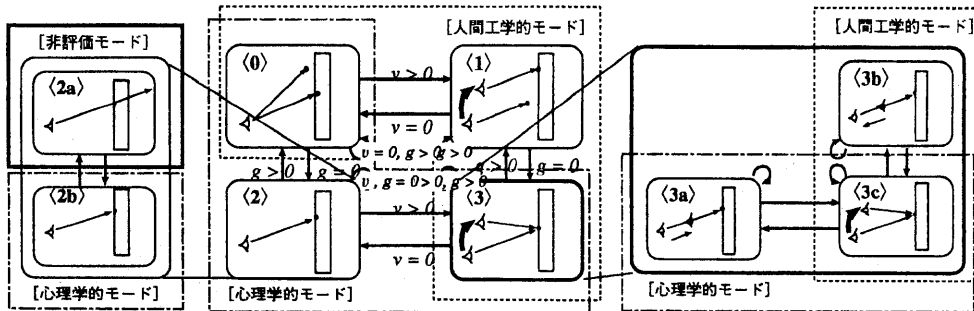


図 3: 拡張評価モード遷移図

State(0): 【視点】 静止, 【注視点】 移動

State(1): 【視点】 移動, 【注視点】 移動

State(2): 【視点】 静止, 【注視点】 静止

<2a>: 注視点上にオブジェクトが存在しない

<2b>: 注視点上にオブジェクトが存在する

State(3): 【視点】 移動, 【注視点】 静止

(3a): 注視オブジェクトに近づく

(3b): 注視オブジェクトから離れる

(3c): 3a, 3b 以外の視点の動き

4.2.3 注視点の速度による LOD 制御

一点をある時間凝視しているときだけ、注視点位置にあるオブジェクトのテクスチャの解像度を一段階上げる。

4.2.4 シーンの明るさによる LOD 制御

人間の目の解像度はシーンの明るさに依存すると仮定し、基準の明るさが半分になると、シーン内のすべての可視オブジェクトのテクスチャの解像度を一段階上げる。

4.3 LOD 選択の拡張

文献 [3] では、オブジェクト-視点間距離に基づく解像度特性曲線 (4.2.1項) を他の 3 つの方針 (4.2.2項 ~ 4.2.4項) に沿ってシフトすることによって TCR を実現していた (図 5)。しかしより詳しく考察すれば、ユーザーの状態によって、要求される画質はシーン内でも異なる分布をもつと考えられる。

すなわち State(2)<3> ではオブジェクトをじっくり見るので視野が狭くなっている一方、State(0)<1> では全体を見渡すという性質上、視野が広がっていると考える。よって、図 6 のように注視点の周りで解像度を変化させることにする [9]。ここで、State(0)<1> の視野の周辺部分の解像度が、State(2)<3> のときと比べて良くなっている反面、視野の中心の解像度は State(2)<3> のときの最高の解像度には達していない

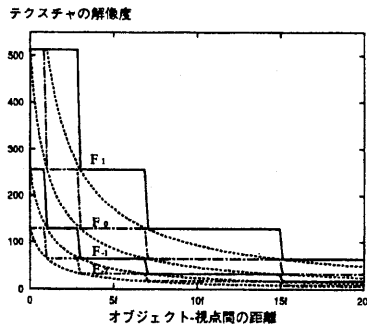


図 5: オブジェクト-視点間の距離とテクスチャ LoD

ことに注意されたい。これにより、フレームレートの均一性が保たれると考えられる。

4.4 行動モデルと可観測性

先行研究では視点を 3D マウスにより、注視点を 2D マウスによりそれぞれ入力していたが、現在、試作システムを、WTK¹ を開発環境にもつ Windows-NT マシン上に移植中である。そこでは以下の対話デバイスが新たに利用可能となった:

- HMD によるヘッドトラッキング
- データグローブによる手の動き

¹WTK(World Tool Kit) は Snese8 社の商標である

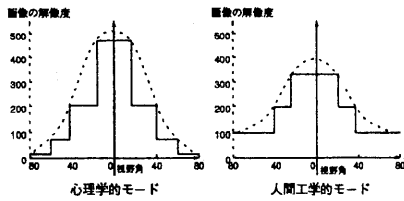


図 6: 評価モードによる解像度の分布の違い

● 磁気センサによる実空間の3次元位置

視点は先行研究と同様に3Dマウスより得ることにするが、HMDによる頭の方向を注視方向とし、注視方向ベクトルとオブジェクトとの交点を注視点とする。

5 まとめと今後の課題と展望

インタリアシミュレーションにおける、フレームレートと画質の間のトレードオフを解消するために、ユーザの要求をより詳細に考慮に入れた拡張行動モデルを提案した。

テクスチャピラミッドを用いたTCR実現の最大の問題点は、隣接フレーム間の解像度の違いに伴う時間的エイリアシングである。現行のピラミッド方式ではテクスチャのピクセル数を2のべき乗で変化させており、隣接フレーム間のコヒーレンスを下げている。この解決策として image morphing が考えられるが、新たに加わる計算負荷の程度を考慮しなければ、真に拡張されたTCRとは認められない。

今回、文献[3]にならい、テクスチャマッピングを用いたハイブリッド方式によるTCRの実現を考えましたが、WTKのように、ハードウェアによって backward でテクスチャマッピングを行なう環境では、テクスチャの解像度を変えてもフレームレート制御に大きな効果は期待できない。しかし、本研究の中心は Application layer でTCRをサポートするためのユーザ行動モデルにあり、それはジオメトリベース方式や、ジオメトリ-テクスチャ相互変換をサポートするハイブリッド方式[4]へ適用しても効果が期待できる。

その他の応用においても、ユーザの状態可観測性を考慮しながら、専用のユーザ行動モデルを開発することができる。探索・観賞等のモードを設けたユーザ行動モデルに基づくバーチャル美術館や博物館の開発は今後の大きな応用例の一つである。

参考文献

- [1] 北浦かほる他：インテリアデザイン教科書，彩国社，1993
- [2] 藤代 一成，田中 利果，丸山 知子：“被験者行動モデルに基づく適応的テクスチャマッピング-画像指向仮想現実感に対するTCRアプローチ-”，画像電子学会 *Visual Computing Workshop'96*，1996
- [3] 丸山 知子，藤代 一成：“適応的テクスチャマッピングを用いた Time Critical Rendering の実現”，グラフィクスとCAD研究会 79-6，pp.39-46，1996
- [4] D. G. Aliaga：“Visualization of complex models using dynamic texture-based simplification,” In *Proc. IEEE Visualization'96*，pp.101-106，1996.
- [5] I. Fujishiro, R. Tanaka and T. Maruyama：“Human behavior-oriented adaptive texture mapping: a time critical approach for image-based virtual showrooms,” To appear in *Proc. IEEE VRAIS'97*, Albuquerque, 1997.
- [6] T. A. Funkhouser, and C. H. Séquin：“Adaptive display algorithm for interactive frame rates during visualization of complex virtual environments,” *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp. 247-254, 1993.
- [7] S. J. Gortler, et al.：“The lumigraph,” *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp. 43-54, 1996.
- [8] M. Levoy and P. Hanrahan：“Light field rendering,” *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, pp. 31-42, 1996.
- [9] T. Ohshima, H. Yamamoto and H. Tamura：“Gaze-directed adaptive rendering for interacting with virtual space,” In *Proc. IEEE VRAIS'96*，pp.103-110，1996.
- [10] G. J. F. Smets and K. J. Overbeeke：“Trade-off between resolution and interactivity in spatial task performance,” *IEEE CG&A*, vol. 15, no. 5, pp. 46-51, 1995.
- [11] A. van Dam, et al.：“Graphics software architecture for the future,” *Computer Graphics*, vol. 26, no. 2, pp. 389-390, 1992.
- [12] A. van Dam：“VR as a forcing function: software implications of a new paradigm,” In *Proc. IEEE 1993 Symposium on Research Frontiers in Virtual Reality*，pp. 5-8，1993.
- [13] P. Zhigerg., Z. Mingmin, Z. Wenting, S. Jiaoying：“Time-critical computing in virtual environment,” In *Proc. CAD/Graphics '95*, Wuhan China, pp. 1078-1083, 1995.