

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20300033

研究課題名（和文）奥行き知覚特性に基づく可視化情報処理手法の研究

研究課題名（英文）Using Depth Cues for Enhancing Data Visualization

研究代表者

高橋 成雄（TAKAHASHI SHIGEO）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：40292619

研究成果の概要（和文）：本研究では、3次元シーンの投影図において、平行線群や遮蔽関係などの奥行き手がかりが我々の視覚に与える影響を記述する数理モデル構築を行った。具体的には、投影図における奥行き手がかりの配置にはある一定程度の歪みが許容され、それを超える歪みを利用することで、我々の視覚注意を意図的に誘導できることがわかった。この結果は、見る人の視覚を考慮に入れたより高品質な可視化画像生成のための基礎を与えることができる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we successfully constructed mathematical models for describing the influence of perspective depth cues on our visual attention to the given visualization images. The obtained results reveal that perspective images can be still be visually consistent even when the associated distortion of the depth cues stays within in some tolerance. We can further present an algorithm for intentionally directing visual attention from viewers by introducing excessive distortion in the layout of the depth cues in the visualization images. Our new findings will serve as the basis for generating high-quality visualization images that take into account the properties inherent in our human visual system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：可視化、奥行き手がかり、奥行き知覚、構図、注視点計測、注視誘導、非透視投影

1. 研究開始当初の背景

コンピュータによる可視化(ビジュアライゼーション)技術研究の歴史は、対象データに内在する特徴をいかに系統的に抽出し、効果的に強調してユーザに提示するかという問題に

対する解決法の模索の歴史であった。しかし、近年我々が直面しているデータは、コンピュータ性能の向上に伴いそのサイズが加速度的に増大し、種類も多次元、多変量、時系列など多岐に渡るようになってきた。

これに対し、このようなデータ複雑化したデータを理解する立場にある、人の知覚能力の限界の問題が近年指摘されるようになってきた。これは、人の知覚の能力の向上は、近年のコンピュータ性能の向上に比して限界があることに大きく起因する。この問題は、従来の対データの問題とは本質的に異なる、対人間の問題としてとらえられ、人の視覚特性を十分考慮にいたした可視化処理技術の重要性が叫ばれるようになった。

2. 研究の目的

従来研究では、基本的に画像の2次元な特徴を工夫することで視覚情報の提示効果の向上を図る、人の低次視覚に基づいた手法がほとんどであり、空間理解などの人の高次視覚に関するものは、研究の数も非常に少ない。申請者の研究グループはこの問題をいち早く認識し、データの解析と人の高次視覚の特性の両方に立脚した可視化技術の研究を行ってきた。

本研究課題では、そのような従来の研究結果を利用しながら、人の高次視覚の中でも、特に重要な奥行き知覚特性に着目し、系統的な可視化情報処理手法の整備を目的とするものである。可視化情報処理に人の視覚特性を考慮する必要性は、人の視覚が固有の知覚の歪みをもっていることに起因する。本研究では、このような人の奥行き知覚に関する歪みの特性を考慮にいたした可視化技法の開発を目指していく。

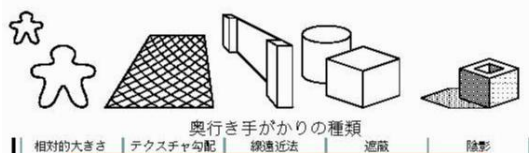


図1: 奥行き手がかりの例

3. 研究の方法

人の視覚は画像として表現されている投影図に多少の不整合があっても、脳内イメージとして整合性のある3次元情報を構築できる融通性をもっている。これは、人は画像全体に一樣に視覚注意を払っているのではなく、図1のように図に含まれる奥行き手がかりの配置から、対象の空間構造を復元しているからである。そのため、画像上に配置される奥行き手がかりとその相対的な位置関係が、人の奥行き知覚にどのような影響を与えるかを、各種奥行き手がかりの組み合わせ方とあわせて解析する必要がある。

本研究では奥行き手がかりのうち、図1の上を示されるような、相対的大きさ、テクスチャ勾配、線遠近法、遮蔽、陰影の5つの単眼性の手がかりに着目して研究を進めていく。

まず、これらの奥行き手がかりの透視投影図における配置が、どのように我々の視覚に影響を与えるかを、物理心理学実験を用いて解析する。その際に、実験で得られたデータを統計的に処理することで、さまざまな奥行き手がかりの配置による影響の定式化を行う。

次に、このような奥行き手がかりの配置を変更することで、透視投影図の構図を自由に変更できる手法の定式化と、それを実現するシステムの構築を行う。ここでは、奥行き手がかりの配置が、空間知覚に影響を与えない範囲を先の実験結果として得ておくこととし、その範囲に必ず奥行き手がかりの配置がとどまるよう、システムが自動的に背景や構図に対して最適化を施す手法を構築する。また、奥行き手がかりの配置により、実際に我々の視覚注意を意図的に誘導できることを、注視点計測装置を用いた実験結果を通して明らかにしていく。

最終的には、このような奥行き手がかりの配置に関する我々の視覚への影響の数理モデルを、奥行き情報を含んだ深度画像の深度情報の変換に適用し、視覚的に最適化された深度画像表現を模索する。さらに、このような深度画像を3次元立体視ディスプレイ等に表示し、実際にユーザがどのように深度情報を知覚できるかについても検討を行う。

4. 研究成果

以下に、本研究で得られた成果について、代表的なものを記す。

概要として、上記で記した奥行き手がかりの配置による我々の視覚への影響のモデル化、そのモデルを用いた投影図の生成と注視誘導の定式化は実現できた((1)と(2))。残念ながら、深度画像の最適な表現とその3次元ディスプレイの応用の問題は、東日本大震災により3次元ディスプレイを含めた機材が破損をし、その代替機が研究期間の終わりにようやく手配できた状況で、現在も研究が進行している状態である。しかしその代わりに、人の視覚注意に関する知見をいろいろな問題に拡張することができ、注視誘導を考える際に重要な概念となる顕著度マップ(Saliency map)に関する研究成果をいくつか得ることができた((3)と(4))。

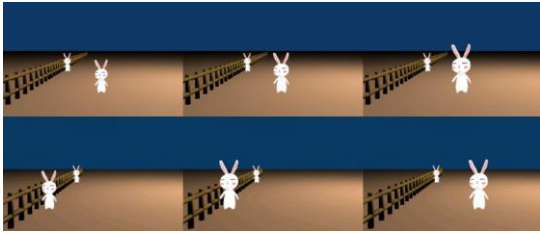


図 2: うさぎの大きさの知覚の前後(上)や左右(下)などの配置の影響. 投影図において, うさぎの大きさが正しく知覚できる許容範囲が存在する.



図 3: 浮世絵の設計例: (a) 奥村政信の「芝居浮絵」(Wikimedia commons より) (b) 芝居のシーンの透視投影図. (c) 知覚の許容範囲を考慮にいれた投影図の歪みの制御.

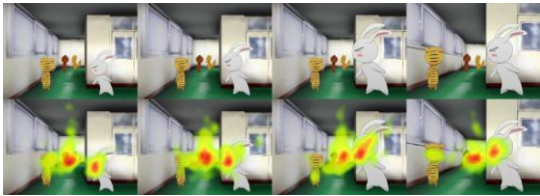


図 4: 様々な投影図の歪み(上側)と, それに伴う注視点分布の影響(下側). (a) 通常の透視投影図, (b) 許容範囲内でうさぎを拡大した投影図. (c) 許容範囲を超えてうさぎを拡大した投影図. (d) シーン全体の歪みが許容範囲に収まるように歪みを最適化した投影図. 投影図の歪みが許容範囲を超えると, 注視点分布の大きな偏りが生じるが, 許容範囲内であればほとんど変化が生じない.

(1) 2次元投影図上の見えの操作に基づいた非透視投影の設計(論文④, ⑩参照)

我々は, 手描きの投影図を見る際に, 自然と投影図に歪みを導入しており, その歪みがある一定の許容範囲に収まっていれば, 対象3次元シーンを問題なく脳内に復元することができる. 例えば, 図2上の3つの投影図を見ると, 3つともうさぎの相対的な大きさが異なるが, どのシーンが正しいうさぎの大きさを描いたものかははっきりしない. 左側にある柵の平行線が奥行きを知覚するための重要な手がかりになるが, それでもなおどのうさぎのペアも同じ大きさを感じられ, 我々の空間知覚には歪みに対してある一定の許容範囲が存在する.

さらに, その許容範囲は先ほどの奥行き手がかりとオブジェクトの配置からも, 影響を

受ける. 図2(下)の3つのシーンを比較すると, 一番左のシーンは, 左側の柵が示す平行線の奥行き手がかりから, 手前と奥のうさぎが同じ大きさであることが, 真ん中のシーンは, 顕著に手前のうさぎが大きいことが視覚的にわかる. ところが, このうさぎを単に右の方に移動して奥行き手がかりである柵から距離をおくと, 途端に2匹のうさぎの大きさがどうなっているのか分からなくなる. つまり, 歪みの許容範囲は奥行き手がかりとオブジェクトの位置関係に依存すると考えられる.

本研究では, 物理心理学実験を通してどのように投影図の歪みの許容範囲が奥行き手がかりとオブジェクトの位置関係に依存するかを調べた. その結果, オブジェクトの大きさの歪みの許容範囲は, おおよそ奥行き知覚からの水平距離に比例して, 大きくなることがわかった. その結果を利用して, 投影図の歪みを制御するシステムの実装し, 実際に歪んだ投影図を生成した事例が, 図3に示されている.

さらに, このような投影図の歪みは, 我々のシーンにおける視覚注意の向け方にも大きな影響を与える. 図4は, 様々な歪みを伴う投影図を被験者に見せて, シーンのどこに視覚注意が集中するかを, 注視点計測を用いて測定した結果である. 図4(下)の結果から, 対象シーンの投影図の歪みが許容範囲を超えると, 視覚注意の分布が大きく影響を受けることが見て取れる. この結果は, 投影図の歪みが我々の視覚注意を意図的に誘導するための, 1つの手法となり得ることを示している.

(2) 最適視点計算を用いた非透視投影図の自動生成(論文⑤, ⑥参照)

ゴッホなどが描く歪んだ絵画は, キュビズムと呼ばれる流れに含まれる. 本研究では, このようなキュビズムに見られる歪んだ絵画の描き方をモデル化することで, キュビズムに見られるような絵画の特徴をもつ画像を自動生成する手法を実現した. さらに, キュビズムの初期から中期にかけての絵画に見られるような, 視点遷移の滑らかさの歴史的な変遷のシミュレーションを試みた.

いま, 図5に対象の各オブジェクトを最適な視点からとらえた投影図を示す. さらに図6は, 各オブジェクトの与えられている視点を, いろいろな滑らかさで補間して, 全体のシーンの歪みを制御した事例である. 我々の手法

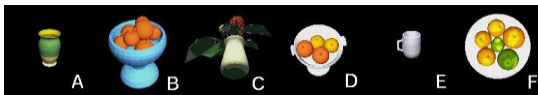


図 5: シーンに含まれる 6 つのオブジェクトを最適視点からとらえた透視投影図



図 6: 様々な滑らかさに依る視点の補間と、全体の投影図の歪みの制御. 左上から右下へ順に, $\gamma=0.3$, $\gamma=0.7$, $\gamma=1.0$, $\gamma=1.2$, $\gamma=2.0$, 最後は透視投影図.

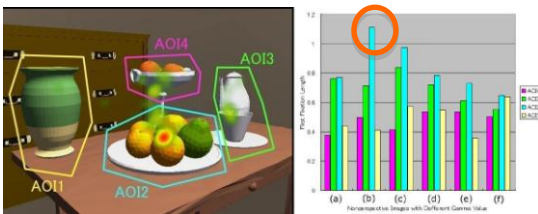


図 7: それぞれの興味領域に注視点が停留する時間の比較.

では, ひとつのパラメータ γ によって, その滑らかさを制御することができ, γ が大きくなればなるほど視点が滑らかになり透視投影図に近づくようになる.

さらに, このような投影図の歪みもまた, 我々のシーンにおける視覚注意の向け方にも大きな影響を与える. 図 7 は, 図 6 のそれぞれの投影図において, どの興味領域にどれだけ長く注視点がとどまるかを, 注視点計測装置を用いて計測した結果を表している. これによると, もし手前の果物に最も注視が集まるようにシーンを歪めたい場合は, $\gamma=0.7$ とすればよいことを, 棒グラフから読み取ることができる.

(3) ボケを利用した画像と動画の視覚注意誘導(論文⑦参照)

何かしら対象シーンを撮影する場合, 背景をわざとボカして前景のみピントを合わせることで, 前景にある被写体に視覚注意を誘導するなどの効果が, 映像製作の場でも頻繁に用いられる. 本研究では, 図 8 に示されるように, 画像や動画から重要であると思われる特徴にフォーカスをあわせて, それ以外の画像領域にはボケを適用することで, 我々

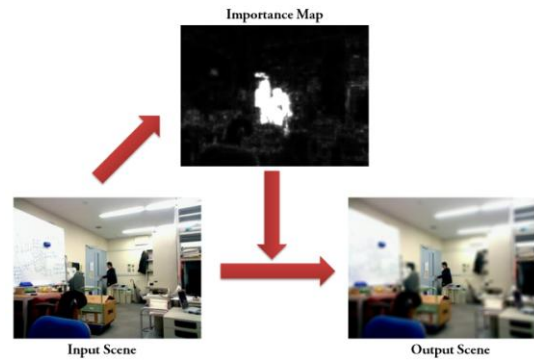


図 8: 重要な特徴を抽出し, その部分にフォーカスを合わせる画像処理の仕組み



図 9: 画像処理前後の画像に対する注視点計測の結果.

の視覚注意をより効果的に重要な特徴に誘導するもの手法を構築した. この手法を用いれば, 例えば防犯用のカメラの監視する際に, 動く物体のみにフォーカスを合わせることで, 侵入者の見逃しを防ぐなどの効果が期待できる.

図 9 は, 実際にそのようなフォーカスとボケを適用した動画が, 我々の視覚注意にどのような影響を与えるかを示したものである. この結果から, 本手法を適用したあとの動画は, フォーカスされている特徴に効果的に視覚注意を誘導できていることがわかる.

(4) 視覚的改良を施した 3 次元モデルへの電子透かし(論文③参照)

上記の画像の動画の特徴部分の抽出手法は, 3 次元の多面体形状にも拡張することができる. そして, 3 次元多面体形状で人の目につきやすい部分とそうでない部分が分類できれば, 3 次元モデルに著作権情報などの秘匿情報を埋め込む際に, 目につきにくいところを中心に埋めこむことで, 視覚的にもそのような秘匿情報の有無が効果的に隠すことができる.

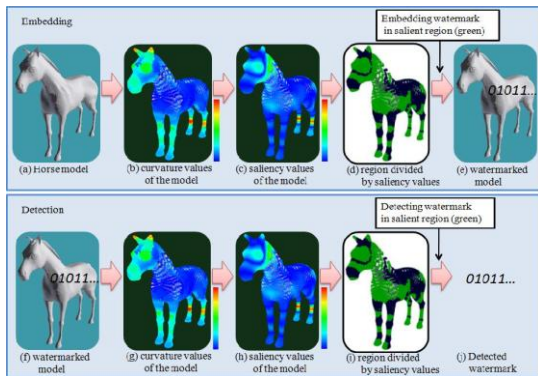


図 10: 視覚的な目立ちやすさを考慮に入れた, 3 次元モデルへの電子透かしアルゴリズムの概要

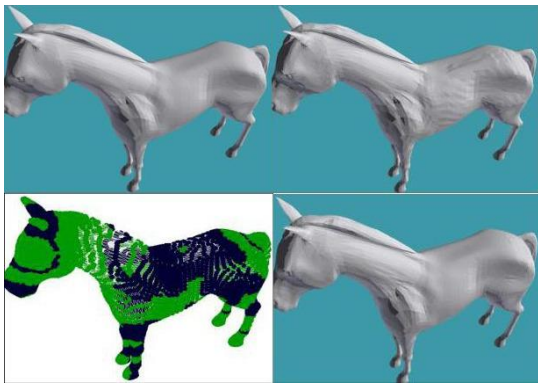


図 11: 視覚的影響を考慮した 3 次元モデルへの電子透かし埋め込み

本研究では, そのような 3 次元モデルへの電子透かし手法の構築を行った. 図 10 は, そのアルゴリズムの概要を示す. まず, 図 10(a) のような入力 3 次元モデルに対して, 形状の曲率(図 10(b))を用いて目立ちやすさの指標を計算する(図 10(c)). その値がある閾値よりも高い領域(図 10(d))に, 電子透かしを埋めこむ(図 10(e)). 同様に, 埋め込んだ透かしを抽出することも可能となる(図 10(f)-(j)).

図 11 は, 馬モデル(図 11 左上)に実際に多面体形状に電子透かしを埋め込んだ例を示している. ここで, 入力された 3 次元モデルに対し, 従来手法は全体に透かしを埋め込むため, 形状の歪みが視覚的に知覚できてしまう(図 11 右上). これに対し, 我々の手法は形状の目立つ部分を同定し(図 11 左下), それを頼りに目立たないように電子透かしを埋め込んでいく(図 11 右下). このように, 人の視覚特性を考慮に入れると, 3 次元形状への秘匿情報の効果的な埋め込みにつなげることができる.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 21 件)

(すべての論文は査読有論文である.)

- ① F. J. Wong and S. Takahashi: "A Graph-Based Approach to Continuous Line Illustrations with Variable Levels of Detail," Computer Graphics Forum, 30(7), pp. 1931-1939, 2011. [10.1111/j.1467-8659.2011.02040.x]
- ② S. Takahashi, I. Fujishiro, Y. Takeshima, and C. Bi: "Previewing Volume Decomposition Through Optimal Viewpoints," in Scientific Visualization: Interactions, Features, Metaphors 2011, Dagstuhl Follow-Ups Series, Vol. 2, Schloss Dagstuhl--Leibniz-Zentrum fuer Informatik, pp. 346-359, 2011. [10.4230/DFU.Vol2.SciViz.2011.346]
- ③ S. Nakazawa, S. Kasahara, and S. Takahashi: "A Visually-Enhanced Approach to Watermarking 3D Models," in Proc. 6th International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, pp. 110-113, 2010. [10.1109/IHMSP.2010.35]
- ④ K. Yoshida, S. Takahashi, H. Ono, I. Fujishiro, and M. Okada: "Perceptually-Guided Design of Nonperspectives Through Pictorial Depth Cues," in Proc. 7th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, pp. 173-178, 2010. [10.1109/CGIV.2010.33]
- ⑤ K. Mashio, K. Yoshida, S. Takahashi, and M. Okada: "Automatic Blending of Multiple Perspective Views for Aesthetic Composition," in Proc. 10th International Symposium on Smart Graphics, (Springer LNCS, Vol. 6133), pp. 220-231, 2010. [10.1007/978-3-642-13544-6_21]
- ⑥ 真塩 海里, 吉田 謙一, 高橋 成雄, 岡田 真人: 「最適視点計算を用いた非透視投影図の自動生成」 画像電子学会誌, Vol. 39, No. 4, pp. 359-368, 2010.
- ⑦ Z. Su and S. Takahashi: "Real-Time Enhancement of Image and Video Saliency using Semantic Depth of Field," in Proc. International Conference on Computer Vision

Theory and Applications 2010, pp. 370-375, 2010.

- ⑧ F. J. Wong and S. Takahashi: "Flow-Based Automatic Generation of Hybrid Picture Mazes," Computer Graphics Forum, 28(7), 1975-1984, 2009.
[10.1111/j.1467-8659.2009.01576.x]
- ⑨ 竹島 由里子, 奈良岡 亮太, 藤代 一成, 高橋 成雄: 「微分位相強調型ボリュームレンダリングのための照明配置設計」画像電子学会誌, 38(4), pp. 459-470, 2009.
- ⑩ 吉田 謙一, 高橋 成雄, 藤代 一成, 岡田 真人: 「2次元投影図上の見えの操作に基づいた非透視投影の設計」画像電子学会誌, 37(4), pp. 412-418, 2008.
- ⑪ 小島 加寿代, 高橋 成雄, 岡田 真人: 「視覚特性を考慮した装飾的フォトモザイク」, 情報処理学会誌, 49(7), pp. 2703-2711, 2008.

[学会発表] (計 16 件, 内招待講演 6 件)

- ① S. Takahashi: "Directing Visual Attention Through Visualization Techniques," 18th International Display Workshop (Invited), December 9, 2011, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan.
- ② 山ノ井 大貴, 桜井 大督, 高橋 成雄: 「タスクを用いたトップダウン刺激による視覚注意システムの検討」, 情報処理学会 グラフィクスと CAD 研究会 研究報告 2011 年 11 月 17 日, 筑波大学, 茨城県つくば市.
- ③ S. Takahashi: "Augmenting 3D Perceptibility in Data Visualization," Dagstuhl Seminar on Scientific Visualization (Invited), June 6, 2011, Dagstuhl, Germany.
- ④ F. J. Wong and S. Takahashi: "A Graph-Based Approach to Natural-Looking Continuous Line Illustrations," Visual Computing/グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2010, June 26, 2010, 神奈川工科大学, 神奈川県 厚木市.
- ⑤ Z. Su and S. Takahashi: "Real-Time Enhancement of Image and Video Saliency Using Semantic Depth of Field," Visual Computing/グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2010, 2010 年 6 月 26 日, 神奈川工科大学, 神奈川県 厚木市.
- ⑥ 中沢 真一, 笠原 翔, 高橋 成雄: 「視

覚的改良を施した 3 次元モデルへの電子透かし」, Visual Computing/グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2010, 2010 年 6 月 26 日, 神奈川工科大学, 神奈川県 厚木市.

- ⑦ 中沢 真一, 高橋 成雄: 「視覚的影響を考慮した 3 次元モデルへの電子透かし」情報処理学会 グラフィクスと CAD 研究会 研究報告, 2009 年 11 月 5 日, 首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス, 東京都 千代田区.
- ⑧ 真塩 海里, 吉田 謙一, 高橋 成雄, 岡田 真人: 「最適視点計算を用いた非透視投影図の自動生成」情報処理学会 グラフィクスと CAD 研究会 研究報告, 2009 年 11 月 5 日, 首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス, 東京都 千代田区.
- ⑨ 小野 広顕, 吉田 謙一, 高橋 成雄: 「3 次元知覚のための奥行き手掛かりの配置における歪みの許容範囲の評価」日本視覚学会 2009 冬季大会, 2009 年 1 月 21 日, 2009, 工学院大学, 東京都 新宿区.

[その他]

ホームページ等
研究室 web page
<http://visual.k.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 成雄 (TAKAHASHI SHIGEO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号: 40292619

(2) 研究分担者

藤代 一成 (FUJISHIRO ISSEI)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 00181347

(3) 連携研究者

岡田 真人 (OKADA MASATO)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号: 90233345