

運転経路が遮蔽されないカーナビゲーションシステム Occlusion-Free Animation of Driving Routes for Car Navigation Systems

吉田 謙一¹ 高橋 成雄¹
Kenichi Yoshida Shigeo Takahashi

西田 友是¹ 嶋田 憲司²
Tomoyuki Nishita Kenji Shimada

¹ 東京大学 大学院新領域創成科学研究科
Graduate School of Frontier Sciences
The University of Tokyo

² カーネギーメロン大学 機械工学科
Department of Mechanical Engineering
Carnegie Mellon University

要旨

本論文では、投影図において地理特徴の遮蔽が回避されたアニメーションの生成手法を提案し、これを運転経路が常に遮蔽されない新しいカーナビゲーションシステムの作成へ応用する。遮蔽回避は、非透視投影を用いて、山や谷などの地理特徴や道路を異なる視点から見るような投影図を生成することで実現される。提案手法は、以下の3つのステップを用いて、アニメーションの個々の非透視投影図フレームを生成する。まず、3次元地形モデルから道路の遮蔽に関する地理特徴を自動的に抽出する。次に、遮蔽が回避されるような地理特徴の配置を投影面上においてばねモデルを用いて求める。最後に、その配置を満たすように3次元地形モデルを変形する。このように得られたフレームに対し、前後複数のフレームについて地形モデルの変形を平滑化することにより、カメラ移動のアニメーションの時間に関するコヒーレンスを保つ。実際の運転ナビゲーションにおいて運転経路の遮蔽が回避されるアニメーションを示し、提案手法の有効性を示す。

1 はじめに

カーナビゲーションシステムは、近年目覚ましい発展を遂げ、鳥瞰図による3次元表示が機能として備わり、ユーザーが実際の景観と対応付けを容易に行えるようになった。その一方で、透視投影を用いて3次元地形形状を立体的に表示すると、探索された経路が建物や地形の起伏などに遮蔽され、運転に必要な経路情報を明確に伝えられないという問題が生じる。

この問題は、商用のカーナビゲーションシステムでは、遮蔽物を透明に表示するなどして対応しているが、遮蔽が幾重にも重なった状況では、注目している経路や地理特徴も重なってしまい、それらの相対的位置関係が伝わりにくい。そのため、このような遮蔽の問題を抜本的に解決するためには、透視投影の法則を崩すことで、道路や地理特徴を投影図上に適切に配置

し、ユーザに提示する必要がある。このような透視投影を崩した投影を、ここでは非透視投影とよぶ。

非透視投影の研究は、いくつかの手法が提案されてきている。透視投影の画像を2次元的な変換を用いてゆがめることにより、異なる視点からの投影の効果をあわせた投影を作り出す手法 [4, 8] や曲がった投影線により透視投影を崩す方法 [2]、指定したカメラパスから見たようなセルアニメーションの背景画に使われるパノラマ画像を作成する手法 [7]、個々の独立した物体が別々の視点から描画し、奥行きを考慮して2次元画面上で合成する手法 [1] などが提案されてきた。その中で、3次元モデルを変形することにより非透視投影の表現能力を向上させる手法が近年考案された [3, 5, 6]。3次元モデルの変形を用いることで、非透視投影を表現の自由度を飛躍的に向上させることが可能となる。

本論文では、このような3次元モデルの変形に基づく非透視投影を用いて、運転経路の遮蔽されないアニメーションを生成する新しい手法を提案する。3次元モデル変形に基づく非透視投影の表現能力は、遮蔽されているものを見せるような複雑な変換を投影図全体で違和感なく施すために、必要不可欠である。しかしながら、それらの非透視投影図の各フレームからアニメーションを生成するには、3次元モデルの変形から生じる2次元投影面の振る舞いを、コヒーレンスの保持のために直接把握する必要が生じる。そこで、最初に3次元モデルの変形を行うのではなく、まず遮蔽回避を行うための制約を直接的に2次元投影面上で求め、それらの制約を満たすように、3次元モデル変形を逆問題として定式化する。

提案手法は以下の3つのステップからなる。まず、3次元地形モデルから道路の遮蔽に関する地理特徴を自動的に抽出する。次に、遮蔽が回避されるような地理特徴の2次元投影面上における配置を、ばねモデルを用いて求める。最後に、その2次元投影面上の配置を満たすように、3次元地形モデルの変形を行う。さらに、これらの静的な非透視投影図をアニメーション化するための、フレーム間コヒーレンスを保持する手法についても提案する。実際の地形標高データを用い

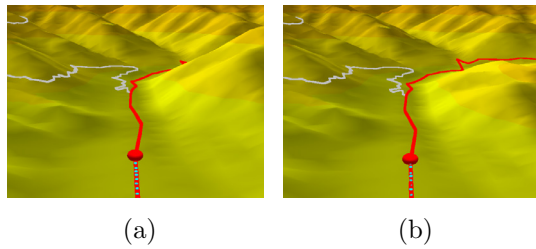


図 1: 運転経路の表示: (a) 透視投影 . (b) 非透視投影 .

て、運転ナビゲーションにおいて起こりうる運転経路の遮蔽に対し提案手法を適用し、その有効性を示す。

本論文は以下のように構成される。2 節では、本論文で実装するカーナビゲーションシステムの概要について説明する。3 節では、2 次元投影面上の制約から 3 次元形状の変形を行うためのアルゴリズム、さらには、カメラ移動のアニメーションのフレーム間コヒーレンスを保持するためのアルゴリズムについて述べる。4 節では、実在する道路網の案内を通じて提案手法の効果を検証する。最後に 5 節で結論を述べ、今後の課題についても言及する。

2 システムの概要

本研究で実装するカーナビゲーションシステムでは、地形形状が一価関数で(ハイトフィールドとして)表現されると仮定し、50m 間隔でグリッド上にサンプルした数値標高データを入力とする。そして、経路が与えられたときに、図 1 のような鳥瞰図のアニメーションを出力する。本システムは、視点の俯角として一般的なカーナビのように 20 度から 70 度の値をとることができるが、様々な角度で試したところ、30 度において遮蔽回避の効果が最もよく確認できた。そのため本論文で以降掲載されるスナップショットは、すべて俯角 30 度を用いて作成されている。

本システムにおいては、経路の遮蔽が生じている部分はそれが回避されるように投影図が変換されるが、それ以外は透視投影図の状態をできる限り保つように非透視投影アニメーションの各フレームを作成する。図 1 は実装したシステムのスナップショットであり、球が現在地を、色の濃い線が探索された経路を、色の薄い線がそれ以外の道路を表している。図 1(a) は通常の透視投影であり、山の背後に経路が隠れてしまうのに対し、図 1(b) の非透視投影の運転経路表示例では、道路の遮蔽が効果的に回避されていることがわかる。

3 アルゴリズム

本手法における、運転経路の遮蔽を回避するアイデアは、投影面上において図 2(a) のように山の輪郭線が

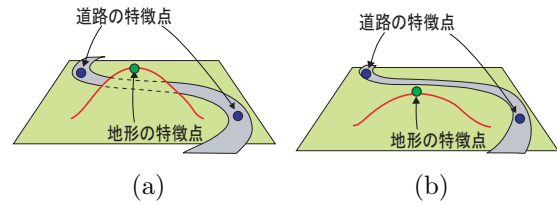


図 2: (a) 経路の遮蔽が生じる特徴点の配置と (b) 特徴点の配置の変換による遮蔽の回避 .

道路の上であり遮蔽が生じている場合に、図 2(b) のように、山の輪郭線が道路と交差しないように変換することである。このような変換は、山などの地形形状や道路から特徴点を取り出し、それらの配置を投影面上で変換し、その変換を 3 次元地形モデルに反映させることにより得ることができる。提案手法のアルゴリズムは、実際には次の 4 つのステップからなる。

1. 地理特徴の抽出
2. ばねモデルを用いた地理特徴の 2 次元最適配置の計算
3. 地理特徴の 2 次元配置を満たす 3 次元形状変形
4. アニメーションにおけるコヒーレンス保持

ここで最初の 3 つのステップは、アニメーションにおける各フレームの生成に関係するのに対し、最後のステップはアニメーションのコヒーレンス保持を行う。以下、それぞれのステップについて説明する。

3.1 地理特徴の抽出

最初のステップでは、遮蔽に関係している可能性のある部分から地理特徴を表す特徴点を抽出する。ここでは、遮蔽部分で必ず出現する地形曲面の輪郭線から山頂や谷底、端点、輪郭線同士の交差点(図 3(a))を地理特徴を表す特徴点として抽出する。さらに、道路からも、曲率が極大となる点、端点、交差点(図 3(b))を特徴点として取り出し、これらの特徴点を結びことで、道路形状を粗く近似できるようにする。

また、地形上および道路上の特徴点は、地形全体から取り出す必要はなく、ビューボリュームに含まれる地形部分のみから取り出す。さらに、図 3(b) のように道路上の特徴点は運転経路上の特徴点、および、交差点の周囲の道路上の特徴点に限定することができる。ここで遮蔽回避を行うためには経路上の特徴点のみで十分であるが、交差点の周囲の道路形状のゆがみを押さえるため必要があるため、交差点周囲の特徴点も抽出されていることに注意する。

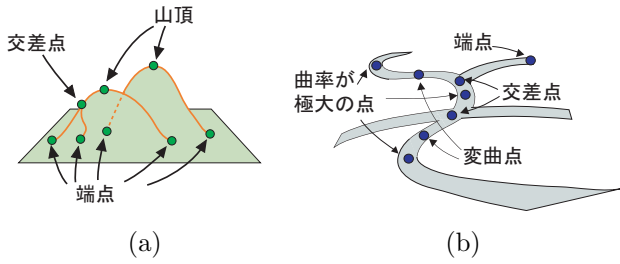


図 3: (a) 地形上の特徴点 . (b) 道路上の特徴点 .

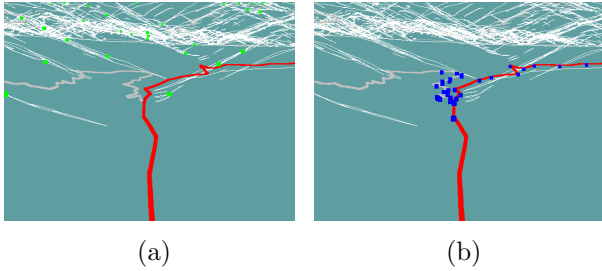


図 4: システムにより抽出された (a) 地形上の特徴点と (b) 道路上の特徴点 .

3.2 ばねモデルを用いた地理特徴の 2 次元最適配置の計算

2 番目のステップでは、2 次元投影面上における特徴点の配置を、ばねモデルを用いた求められる最適配置として求める。ここでの最適配置とは、道路の遮蔽を回避しつつ、元の透視投影をできる限り保持する特徴点の配置のことを意味する。

そのような最適配置は 2 次元投影面上において、遮蔽が完全に回避された特徴点の位置関係を求め、その位置関係を保持したまま透視投影における特徴点の配置へばねモデルを用いて近づけることで求めることができる。まず、遮蔽が完全に回避された位置関係として、特徴点を水平面に投影した位置 $\{q_i\} (i = 1, \dots, n)$ (図 5(c)) を用いる (n は特徴点の数)。これは、地形形状が一価関数であると仮定しているため、水平面上に射影すれば必ず地形形状による遮蔽が生じないことが保証されるからである。次に、その配置から、透視投影の配置 $\{p_i\} (i = 1, \dots, n)$ (図 5(a)) にできる限り近づけるために、以下のようにばねモデルを構築する。まず、図 5(c) の特徴点配置に対し、Delaunay 三角形分割を施し (図 6)、それぞれの辺の端点に各特徴点の相対位置関係を保持するばねをつける。さらに、各特徴点 q_i が、対応する透視投影の位置 p_i に近づくように、 p_i と q_i の間にもばねをつける。このばねモデルの平衡状態として、特徴点の最適配置 (図 5(b)) を求める。ここで、最適化計算中に特徴点間を結ぶ辺が交差しないようにチェックすることで、道路の特徴点とそ

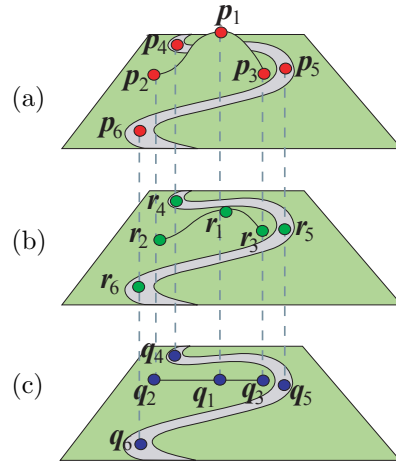


図 5: 特徴点の配置: (a) 透視投影図上の配置 . (b) 最適配置 . (c) 水平面に射影した配置 .

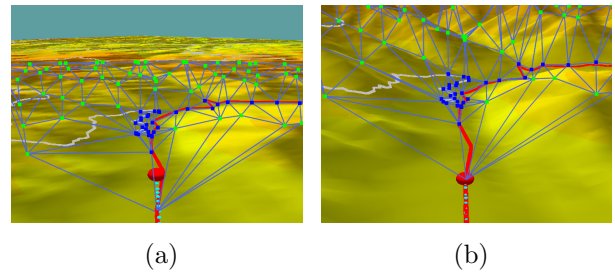


図 6: 特徴点の Delaunay 三角形分割: (a) 最適化前 . (b) 最適化後 .

れに接続する地形上の特徴点の相対位置関係を保持することができ、遮蔽が回避された特徴点配置を実現することができる。

実装では、各特徴点に働くばねの力を以下のように定式化した。

$$\begin{aligned}
 F_i = & -k_i(\mathbf{x}_i - \mathbf{p}_i) \\
 & - \sum_{j \in A} k_{ij} (|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| - |\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j|) \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|} \\
 & - \sum_{\substack{i \in R, j \in T \\ i \in T, j \in R}} k'_{ij} \frac{\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^{\frac{1}{2}} |\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j|} . \quad (1)
 \end{aligned}$$

F_i がインデックス i の特徴点に働く力であり、 A は Delaunay 三角形分割で隣接している特徴点のインデックスの集合、 R が道路上の、 T が地形上の特徴点のインデックスの集合である。右辺の第 1 項が透視投影に近づける力、第 2 項が相対位置関係を保持するための力である。さらに、第 3 項は道路上の特徴点と地形上の特徴点の間の斥力としてはたらく。この斥力は、道路と山などのそれぞれの地理特徴が、投影図上でお互

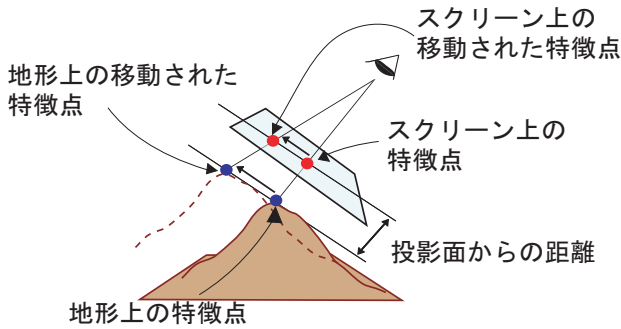


図 7: 投影面上の最適配置を満たすような、特徴点の 3次元空間における移動。投影面からの距離が保持される。

い干渉しあうことなく離れて配置されるように導入されている。

3.3 地理特徴の 2次元配置を満たす 3次元形状変形

実際に遮蔽を回避した非透視投影図を生成するためには、3.2節で求められた 2次元投影面上の特徴点の最適配置を満たすように 3次元地形形状を変形する必要がある。しかし、2次元投影面上の特徴点配置からでは、3次元空間における特徴点位置を奥行き方向までは決めることができない。本手法では経験的に、変形前と変形後で、投影面から地形モデル上の特徴点までの距離が図 7 のように不変であるとして、特徴点の 3次元空間における配置を求めている。このようにすることで、変形後の地形上の特徴点の位置が定まるので、その位置を 3次元地形形状に変形を加える際の幾何的制約として用いていく。

本手法では、変形前後の地形形状の差分を、ガウス関数による Radial Basis Function (RBF) の線形和として表現し、地形上の特徴点の位置制約から得られる連立方程式を解くことにより、差分形状を求めている。このように差分形状を考えることで、地形曲面に本来存在する高周波成分の起伏を保持したまま変形を施すことができることに注意する。

特徴点の抽出の場合と同様に、変形領域を限定し、計算を効率化することができる。実際には、急激なカメラのパンに対応するために、投影面を 2 倍のサイズとしたときのビューボリュームを考え、その中に含まれる地形領域に対し変形を施している。図 8 は通常より遠い視点から地形形状を見たものであり、黒い点で表されている範囲が実際に変形された領域を示している。図 9 は、変形前後の地形形状を横から見たものを示している。経路を遮蔽している山を低くするように変形することで、遮蔽が回避されていることが確認できる。

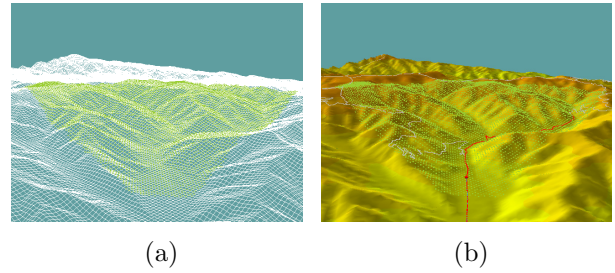


図 8: 変形領域の制限 (黒い点で表された範囲): (a) ワイヤフレーム表示。(b) サーフェス表示。

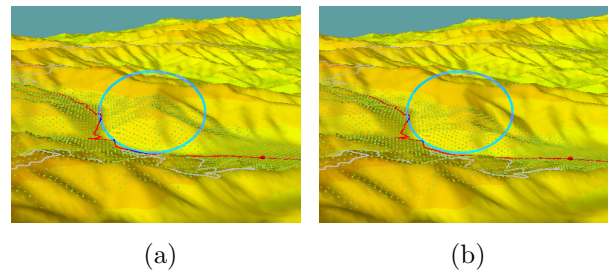


図 9: 地形の変形効果 (横から見た図): (a) 変形前。(b) 変形後。

3.4 アニメーションにおけるコヒーレンス保持

今までの 3 つのステップにより、非透視投影によるアニメーションの個々のフレームは生成することができるが、これらをただコマ送りしても、時間に関するコヒーレンスを保持したアニメーションは生成できない。このようなコヒーレンスを保持するために、本手法では 2 つの処理を施す。

まず、フレーム間において、可能な限り同一の特徴点を選択する。これは、前フレームで用いられていた地理特徴点が、現在のフレームでもビューボリューム内に存在していれば、そのまま同じ特徴点を用いるようにすることで、実現される。図 10 は連続したフレームで特徴点が取られた様子を示している。図 10(a) は特徴点の再利用を行っていないものであり、フレームが 1 つ進むことでまったく異なる特徴点が選ばれていることが確認できる。この場合、予期せぬ地形の局所的変形が起こり、アニメーションとしては不自然なものとなる。それに対し、図 10(b) のように特徴点の再利用を行うと、フレーム間における特徴点の不一致によって生じる局所的な変形を排除することができる。

さらに、前後複数のフレームにおいて求められる変形を表す差分形状を平滑化することで、フレーム間コヒーレンスをより保つようにする。実装では、現在のフレームに対し、前後各 4 フレームを用いて、ガウス関数による重み付けを用いた平滑化を施している。

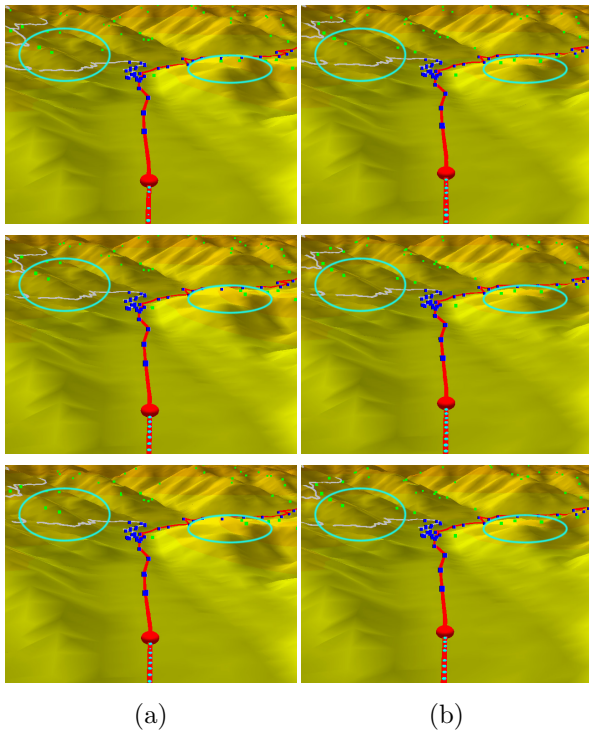


図 10: 特徴点の取られ方: (a) 再利用なし. (b) 再利用あり.

4 結果

実際の地形標高データと道路網データをもとに、カーナビゲーションの案内画面としての、非透視投影のアニメーションを生成した。ここで、1 フレームあたりの計算時間は、CPU 3.0GHz Pentium 4、メモリ 2GB RAM で、およそ 3 秒である。

図 11 は長野県武石村の例で、図 11(a) が透視投影、図 11(b) がコヒーレンスを保持した非透視投影である。図 11(a) では山に遮蔽され見えない道路が、図 11(b) では右手の山を低くすることで見えるようになっている。さらに、図 11(a) の遮蔽が生じていない領域は、図 11(b) ではほとんど変化しておらず透視投影が保たれている。

図 12 は長野県霧ヶ峰の例であり、通常の透視投影を用いると、図 12(a) のように運転経路が山の起伏によって幾重にも遮蔽されてしまうことに注意する。この場合、山を透明に表示しても、経路自身が幾重にも遮蔽されてしまうため、経路の遮蔽を回避することができない。図 12(b) からわかるように、本手法では経路を投影図上で適切に配置することで、不必要な遮蔽を回避することができる。

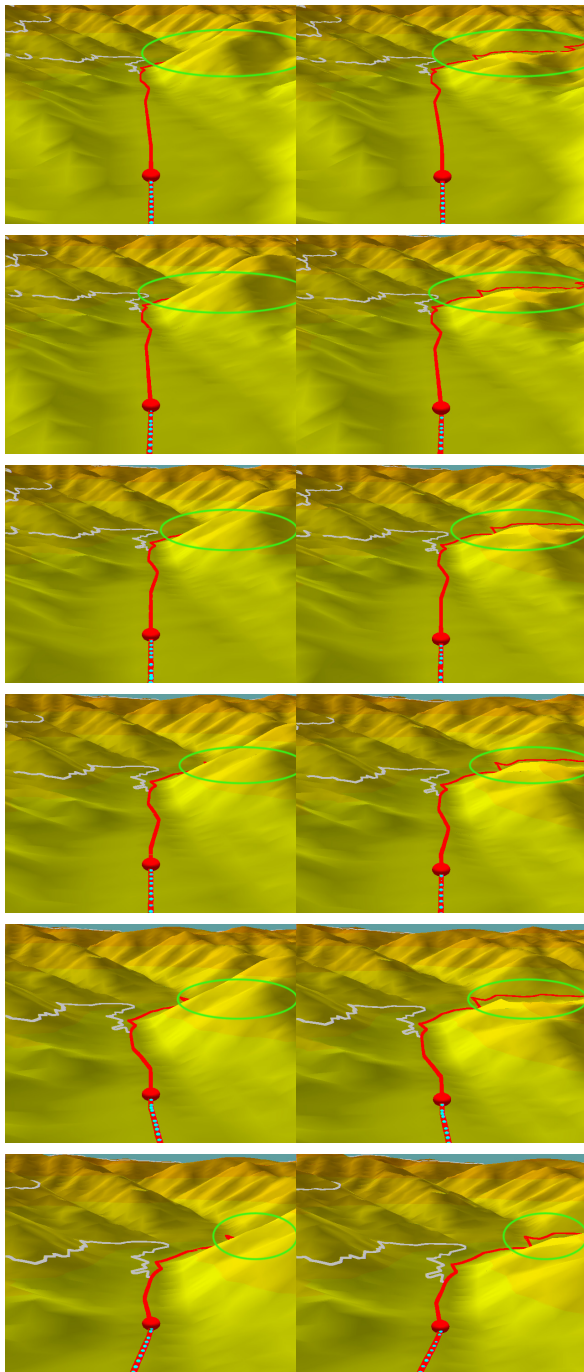
5 おわりに

本論文では、非透視投影を用いた遮蔽回避の手法を提案し、運転経路が常に見えるカーナビゲーションシステムへと応用した。提案手法は、3次元地形モデルから特徴を自動抽出し、2次元投影面上で特徴点の遮蔽が回避されつつ、できる限り透視投影に近い配置を求め、それを満たすような3次元地形モデルの変形を行う。さらに、特徴点の取り方を制御することにより、時間に関するコヒーレンスを保持する。実際の標高データと道路網データを用いたプロトタイプシステムを作成し、本手法が遮蔽を回避した非透視投影アニメーションが作成可能であることを示した。

今後の課題として、非透視投影の対象を、建物などの直方体形状などにも拡張し、それらが滑らかな地形曲面と並存する場合でも効果的に表示できるシステムを構築することがあげられる。

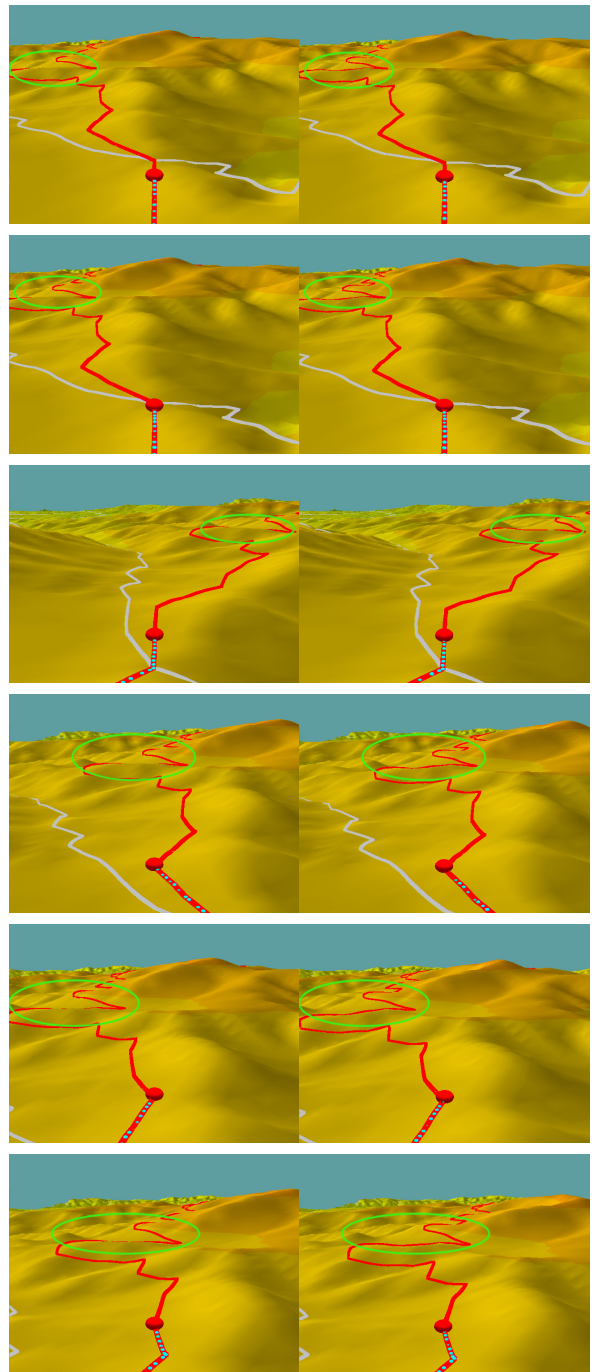
参考文献

- [1] M. Agrawala, D. Zorin, and T. Munzner. Artistic multiprojection rendering. In *Eurographics Rendering Workshop 2000*, pages 125–136, 2000.
- [2] Y. Kurzion and R. Yagel. Interactive space deformation with hardware-assisted rendering. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 17(5):66–77, 1997.
- [3] P. Rademacher. View-dependent geometry. In *Computer Graphics (Proceedings of Siggraph '99)*, pages 439–446, 1999.
- [4] S. M. Seitz and C. R. Dyer. View morphing. In *Computer Graphics (Proceedings of Siggraph '96)*, pages 21–30, 1996.
- [5] K. Singh. A fresh perspective. In *Proceedings of Graphics Interface 2002*, pages 17–24, 2002.
- [6] S. Takahashi, N. Ohta, H. Nakamura, Y. Takeshima, and I. Fujishiro. Modeling surperspective projection of landscapes for geographical guide-map generation. *Computer Graphics Forum*, 21(3):259–268, 2002.
- [7] D. N. Wood, A. Finkelstein, J. F. Hughes, S. E. Thayer, and D. H. Salesin. Multiperspective panoramas for cel animation. In *Computer Graphics (Proceedings of Siggraph '97)*, pages 243–250, 1997.
- [8] D. Zorin and A. H. Barr. Correction of geometric perceptual distortions in pictures. In *Computer Graphics (Proceedings of Siggraph '95)*, pages 257–264, 1995.



(a)

(b)



(a)

(b)

图 11: 長野県武石村: (a) 透視投影 . (b) 非透視投影 . 图 12: 長野県霧ヶ峰: (a) 透視投影 . (b) 非透視投影 .