

生成画像誤差最小化による EPI 解析

新谷 幹夫[†]

納富 幹人[†]

南田 幸紀[†]

斎藤 隆文^{††}

Epipolar-Plane Image Analysis by Error Minimization of Synthesized Images

Mikio SHINYA[†], Mikito NOTOMI[†], Kouki MINAMIDA[†], and Takafumi SAITO^{††}

あらまし コンピュータグラフィックスの発展に伴い、複雑かつ写実的な CG モデルを効率的に作成する技術が求められている。本論文では EPI 解析に基づく CG モデル自動作成法として、生成画像誤差最小化法を提案する。本手法では、生成される画像と入力画像との差が最小になるように CG モデルを再構成する。この最小化が、動的計画法を繰り返し適用することにより、効率的に実現できることを理論的に示す。更に、屋内外において撮影を行った画像を用いた実験により、視覚的に忠実度の高い CG モデルが作成できることを実証的に示す。

キーワード エピポーラ平面画像解析、誤差最小化、動的計画法、画像ベースモデリング、コンピュータグラフィックス (CG)

1. ま え が き

近年のコンピュータグラフィックス (CG) 技術の進展により、映画、コマーシャルフィルムはもとより、ホームページなどでも CG 映像は重要な役割を果たすようになってきた。これに伴い、複雑かつ写実的な CG モデルを効率的に作成することが大きな課題となっている。CG モデル作成効率化のエースとして登場したのが、画像ベースのモデリング手法であり、活発な研究が続けられている [1]。

画像ベースモデリング手法は、コンピュータビジョンの分野で開発されてきた 3 次元情報獲得技術を応用するものであるが、特に、獲得されたモデルから写実的な画像生成ができることが重要なポイントとなる。このため、3 次元幾何構造のみならず、面の接続、テクスチャの獲得が重要である。

筆者らは、エピポーラ平面画像 (Epipolar Plane Image, EPI) 解析 [2] を用いて、ビデオ映像から CG モデルを作成する研究を続けている。EPI 解析を利用する利点は、エピポーラ拘束が画面列を通じて一定で

あるため、対応点の探索のみならず、接続の決定も容易になる点である [3]。他方、欠点はカメラの運動が等速平行運動に限られてしまう点にあるが、カメラ位置の補正などにより、運動の条件を緩和することが可能である [4], [5]。

本論文では、特徴点の接続を効果的に決定する手法として、生成画像誤差最小法 [3] を提案し、理論及び実験結果を詳細に論じる。CG 応用においては、良好な画像を生成し得るモデルが良好な CG モデルであるとみなすことができよう。入力画像は実際に撮影されたものであるから「良好な画像」であると考えられる。そこで提案手法では、獲得された CG モデルから生成される画像列と入力画像列の差が最小となるように接続を決定し、この意味で最良な CG モデルを生成する。この最小化プロセスが、多段的な動的計画法 (DP) により効率的に実現できることを示すとともに、効果を実験により示す。

2. EPI 解 析

EPI 解析は動画像から情景の 3 次元構造を復元する手法で、Bolles の提案 [2] 以来、活発に研究が進められている。3 次元復元の原理は以下のようなものである。図 1 に示すように、カメラが視線に垂直かつ水平方向に等速運動し、静止している物体を撮影している。入力画像列を $i(x, y; t)$ とし、 $y = y_0$ でのスライス

[†] 日本電信電話株式会社 NTT サイバソリューション研究所、横須賀市

NTT Cyber Solutions Laboratories, NTT Corporation, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

^{††} 東京農工大学、小金井市

Tokyo University of Agriculture & Technology, Koganei-shi, 184-8588 Japan

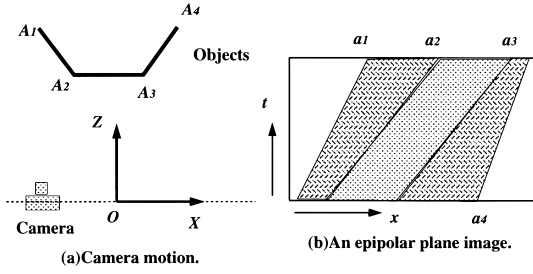


図 1 EPI 解析
Fig. 1 EPI analysis.

$$I(x, t) = i(x, y_0; t) \quad (1)$$

を EP 画像 (Epipolar Plane Image) と呼ぶ。このとき、物体上の一点の像点の軌跡は、同一 EP 画像上の線分となり、その傾きは物点の奥行に比例する。したがって、エピポーラ画像上で直線を抽出し、その傾きを求めれば、対応する特徴点の 3 次元座標が求められる。

しかし、画像生成で用いる CG モデルを作成するためには、頂点の座標のみでは不十分で、頂点間の接続を決定し、テクスチャ表現やオクルージョン処理を可能としなければならない。入力画像の色情報による領域分割を利用する手法 [6]、特徴点の奥行値のしきい値処理で接続を決める方法 [7] などが試されているが、より体系的かつ安定な手法が望まれている。一方、特徴点軌跡の始点と終点が抽出されて線分として表現できれば、論理的に可能な接続関係を記号処理的に求めることも可能である [8]。しかしながら、特徴点軌跡を直線として抽出することに成功したとしても、線分の交点付近では軌跡の追跡が不安定になるなどの理由により、線分として安定に抽出することは困難である。また、論理的探索により解を求めるので、部分的な小さな誤りが論理的な矛盾を発生させ、結果全体に大きな影響を与える可能性もある。したがって、雑音を含む複雑シーンの解析に適用することは、事実上困難である。

そこで本論文では、直線として抽出された特徴点軌跡の接続関係を大局的な最小化処理により安定に決定する手法を提案する。具体的には、生成される画像と入力画像との差が最小となるように、抽出された n 個の直線 (特徴直線と呼ぶ) から、 m 個の特徴直線を選出し、その接続を決定する。この処理を生成誤差最小化法と呼ぶことにする。本処理では、入力画像に含

れるオクルージョン情報が接続決定に反映されるとともに、誤抽出された直線を排除することも可能となる。

3. 生成誤差最小化法

本章では、生成誤差最小化法が動的計画法により実現され、効率的に最小値が求められることを示す。まず、簡単のためオクルージョンの存在しない場合について議論し、次いで一般的な場合に拡張する。前者の処理は後者に含まれ、実際には後者の処理のみが実行される。

3.1 オクルージョンのない場合

図 1 (b) に示すように、撮影画像上でオクルージョンが発生しないときには、特徴直線は互いに交差することはない。この性質を利用すると最小化処理が大変容易になる。以下、誤差の算出及び最適化手法を述べる。

3.1.1 生成画像誤差

2 本の特徴直線を $x = a_1(t)$, $x = a_2(t)$ としよう。 a_1 と a_2 を接続したときの生成画像誤差 $h(a_1, a_2)$ は、この 2 直線に挟まれた領域における入力 EPI 画像 I_0 と生成 EPI 画像 I_{syn} の差の積分、

$$h(a_1, a_2) = \int_t \int_{a_1(t)}^{a_2(t)} \|I_0(x, t) - I_{syn}(x, t)\| dx dt \quad (2)$$

で定義できる。ただし、 $\|\cdot\|$ は色差のノルムで、例えば、 $I = (r, g, b)$ に対して、

$$\|I\| = I^2 = r^2 + g^2 + b^2 \quad (3)$$

などとすることができる。

生成 EP 画像 I_{syn} は使用する画像生成アルゴリズムに依存する。本論文では、写実的な画像生成を行うには実写画像に含まれる豊かなテクスチャを利用することが有利であることを考慮し、テクスチャマッピング法による画像生成を想定する。他の生成手法では面の法線や光源の方向、更には相互反射まで考慮する必要があるため最適化等の取扱いが困難であるが、テクスチャマッピングに限定すれば、以下のように容易に計算が可能となる。

テクスチャ $f(s)$ が $0 \leq s \leq 1$ の範囲で定義されているものとする。このとき、生成画像 I_{syn} は、

$$I_{syn}(x, t) = f((x - a_1(t))/(a_2(t) - a_1(t))) \quad (4)$$

と表せる。これを式 (2) に代入すれば、

$$h = \int_t \int_{a_1(t)}^{a_2(t)} [I(x, t) - f((x - a_1(t)) / (a_2(t) - a_1(t)))]^2 dx dt \quad (5)$$

$$= \int_0^1 ds \int_t (I_0((a_2 - a_1)s + a_1, t) - f(s))^2 \cdot (a_2 - a_1) dt \quad (6)$$

となる。

次に、誤差を最小にするテクスチャ関数を求め、誤差関数を確定する。上式を f に関し微分し、0 とおく。

$$\begin{aligned} \partial h / \partial f &= 2 \int ds \left[\int_t (a_2 - a_1) I_0((a_2 - a_1)s + a_1, t) dt \right. \\ &\quad \left. - f(s) \int_t (a_2 - a_1) dt \right] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

これを解けば、

$$f(s) = \frac{\int_t (a_2 - a_1) I_0((a_2 - a_1)s + a_1, t) dt}{\int_t (a_2 - a_1) dt} \quad (8)$$

を得る。すなわち、画像の流れに沿った平均色をテクスチャにとればよい。これと式 (6) から、誤差関数 $h(a_1, a_2)$ は

$$h(a_1, a_2) = \int_0^1 \left[\int_t (a_2 - a_1) I_0^2 ds - \left(\int_t (a_2 - a_1) I_0 dt \right)^2 \right] ds \quad (9)$$

すなわち、流れに沿った画素値の分散で求められることがわかる。

3.1.2 動的計画法による最適化

オクルージョンが存在しない場合は、特徴直線は EP 画像内で交差しない。したがって、特徴直線 a_1 と a_2 を接続したときの誤差 $h(a_1, a_2)$ は式 (9) で示されるように、他の特徴直線に依存しないで定まる。この特徴を利用すると、ステレオマッチングと同様に動的計画法 (DP) [9] により効率的に大局的最適解を得ることができる。

n 本の特徴直線 $\{l_1, \dots, l_n\} = L$ から任意数 (m) の特徴直線 $\{\lambda_1, \dots, \lambda_m\} = \Lambda$ を選出し、誤差の和

$H(\Lambda)$ を最小化する。オクルージョンがない場合は特徴直線が交差しないので、例えば左から順番に番号付けできる。すると、誤差関数 H は、隣接する選出特徴直線間の誤差の和は、

$$H(\lambda_1, \dots, \lambda_m) = \sum_{i=0}^m h(\lambda_i, \lambda_{i+1}) \quad (10)$$

と表せる。ここで、 $\lambda_0 = l_0$ 及び $\lambda_{m+1} = l_e$ は EP 画像の左右の境界、 $x = 0$ 、 $x = n_x$ である。

$H(\Lambda)$ は m 変数関数なので、その最適化は m 次元探索で困難であるように見える。しかし、式 (10) の右辺を見ると、DP の適用が可能であり、以下のように $O(n^2)$ で最適解が得られる。これは、例えば以下のように実現できる。

まず、DP 関数 $w(l)$ を

$$w(l_1) = h(l_0, l_1) \quad (11)$$

$$w(l_j) = \min_{0 \leq i < j} [h(l_i, l_j) + w(l_i)]. \quad (12)$$

と定義すると、最適化処理は

$$\begin{aligned} \min_{\Lambda \subset L} H(\Lambda) &= \min_{\lambda} (\min_L H(\lambda_1, \dots, \lambda) + h(\lambda, l_e)) \end{aligned} \quad (13)$$

$$= \min_{\lambda} (w(\lambda) + h(\lambda, l_e)). \quad (14)$$

と表せる。探索自身は線形で、それぞれの $w(l)$ の計算に $O(n)$ 、これが n 個で結局 $O(n^2)$ で最適化できる。また、選出する特徴直線数 m もこのプロセスで自動的に決定される。

3.2 多段 DP によるオクルージョン処理

前節で述べたように、オクルージョンが存在しない場合には、大変簡単に最適化が行われる。ところがオクルージョンがある場合には、手前にある特徴点がある特徴点を隠すので、誤差関数の独立性が損なわれ、前節のように単純に DP を適用できない。しかし、逆に、手前にある特徴点は後ろにある特徴点に隠されることはない。そこで、この性質を利用し、手前にある特徴点の接続から順次決定していく戦略を採用する。これにより、多段階的に DP を適用し、効率的に最適解を得ることができる。

3.2.1 初期処理

図 2 に示す例で考える。図の特徴直線の中で、交わるすべての直線より傾きが大きい直線 (l_3, l_4) は他の特徴直線に隠されない。これらを主特徴直線と呼ぶこ

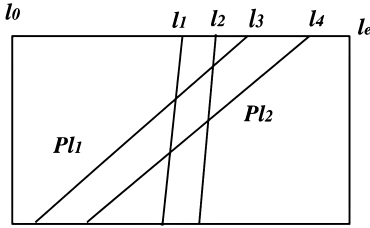


図 2 オクルージョンの例
Fig.2 Occlusion example.

とし、 Pl_i と表す．主特徴直線の接続に関する誤差 $h(Pl_i, Pl_j; stat)$ を以下のように定義する．

- $stat=closed$; Pl_i, Pl_j が接続した場合の誤差．他の特徴直線に隠されることはないので，式 (9) で求められる．
- $stat=open$; Pl_i, Pl_j が接続しない場合の誤差．この場合は，二つの主特徴直線の間に存在する他の特徴直線に依存するが，その中で，この区間において得られる最小誤差により定義する．計算法は後述．

さて，最適な主候補直線の接続は

$$H_{Pl} = \min_{Pl} \sum h(\lambda_i, \lambda_{i+1}; stat) \quad (15)$$

により求めることができる（ただし，両側で open となる特徴直線は，存在意味がないので棄却される）．この最小化は，DP により決定することができる．接続すると判定された主特徴直線に挟まれた領域は，実空間で対応する特徴点を結んだ線分が可視である領域であるので，これを可視スパンと呼ぶことにする．

次に，開放時の誤差 $h(pl_1, pl_2; open)$ の計算法を示す．主特徴直線 pl_1, pl_2 に囲まれた領域 R_{pl_1, pl_2} に存在する特徴曲線 $l_i^{(1)}$ とする．すべての $l_i^{(1)}$ が交差しない場合は，式 (9) の積分領域を R_{pl_1, pl_2} の内部に限定し，式 (14) の DP により最小誤差を求め，誤差値とする． $l_i^{(1)}$ が交差する場合は，主特徴直線の選出と同様に，この領域で隠されることのない特徴直線 $pl_i^{(1)}$ を選び出す．これをこのレベルでの主特徴直線とみなし，式 (15) を求める最小化処理を再帰的に適用することで，最小誤差を求める．このようにして初期処理により主候補直線の接続判定が実現される．付録 1. に示すように「正解が特徴直線に含まれており，それが，任意の区間で最小誤差を与える」と仮定すると，この処理で最小化が実現されることが示される．

3.2.2 継時処理

可視スパンは隠されることはないので，処理領域が

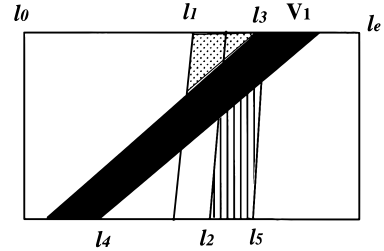


図 3 接続した可視スパンが主特徴直線を隠す例
Fig.3 A connected visible span may occlude primal featurelines.

ら除外する．次いで，可視スパン以外には隠されることのない特徴直線を新たに主特徴直線として選出する．この主特徴直線の接続を前節のように最小化により決定すればよいわけである．ただし，注意すべき点は，図 3 に示すように，特徴直線と可視スパンと接続したスパンは，主特徴直線を隠し得ることである．図の例では，可視スパン V_1 は l_1 と接続し，主特徴直線 l_2 を可視スパン以外の領域で隠している．

すなわち， n 個の可視スパン $\{V_i\}$ が特徴直線 cl_i と接続し，かつ，主候補直線 p_i, p_j を接続した場合の誤差は，すべての V_i の接続に依存する可能性がある．つまり，組合せ的な探索が必要となる可能性がある．しかしながら「物体面が互いに交差することはない」という幾何学的条件を導入すると， p_i, p_j を挟み，かつ特徴直線と接続する可視スパンの組，

$$h(p_i, p_j) = h_v(p_i, p_j; (V_k, l_k), \dots, (V, k'l'_k))$$

にのみ依存することを証明できる（付録 2. 参照）．

さて， H_v を

$$\begin{aligned} H_v(v_1, v_2; \mu_1, \mu_2) \\ = \min_{\lambda_i} h_v(v_1, v_2; \mu_1, \mu_2, \lambda_1, \dots, \lambda_m) \end{aligned} \quad (16)$$

のように定義すると，可視スパン v_1, v_2 が特徴直線 μ_1, μ_2 と接続した場合，両可視スパンに挟まれた領域^(注1)における最小誤差を表す．これは，DP により求めることができる． H_v の全領域に関する和 H は

$$H(V_0, \dots, V_m; \mu_0, \dots, \mu_m)$$

(注1): 可視スパンが交差する場合もあり得る．しかしこの場合，一方の可視スパンは特徴直線と接続することができないので（付録 3.），これを処理から除外することにすれば，二つの可視スパンの左右関係を一意に決定し，これらが狭む領域を決めることができる．

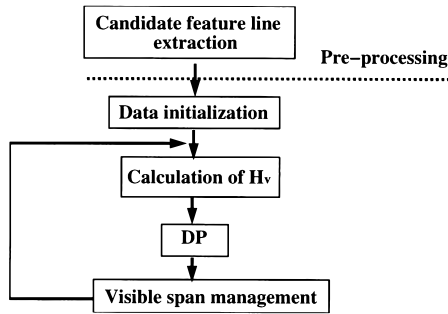


図4 提案アルゴリズムの概要

Fig. 4 Outline of the proposed algorithm.

$$= \sum_i H_v(V_i, V_{i+1}; \mu_i, \mu_{i+1}) \quad (17)$$

$$V_0 = v_0$$

$$V_m = v_e \quad (18)$$

と表すことができる。ただし、 v_0 、 v_e は左端及び右端の可視スパンである。この H の最小化を DP で行うことで、可視スパンの接続及び主特徴直線の接続が決定される。

決定された接続を可視スパンとして追加し、本項の処理を繰り返し適用する。1 回の処理で、少なくとも左右端の可視スパンに接続する特徴直線は決定されるので、この繰り返し処理により、すべての接続が決定できる^(注2)。

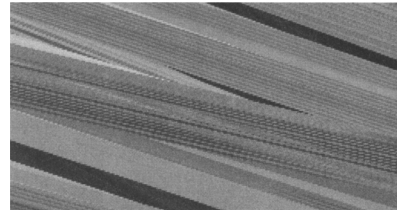
以上の処理の流れを、図 4 に示す。

4. 実 験

実写映像を撮影し、生成誤差最小化法を適用した。図 5 に入力画像及び入力 EP 画像の一例を示す。撮影はモーションコントロールカメラを用いて、スタジオ内で行った。抽出された特徴直線は 70 本で(図 6(a))、処理を適用するごとに、手前から奥へと接続が決定され(同、(b)~(d))、最終的に 60 本の可視スパンが得られている。得られた 3 次元線分を上方から投影したものを図 6(e) に示す。また、得られたモデルから生成された画像の例を図 7 に示す。視覚的には十分満足できる画像生成が実現されているといえよう。画像サイズは 256×389 、137 フレームで、処理時間は全体で 22.5 分、1 スキャンライン当たり平均 3.5 秒(SGI ワークステーション, R1000, 195 MHz)であった。また、生成画像の自乗誤差は 0.97% であった。次に、屋外での実験例を示す。図 8 が入力画像の一例である。



(a) An example of the input sequence.



(b) An example of EPIs. The corresponding scan-line is indicated as a red line in (a).

図5 入力画像例

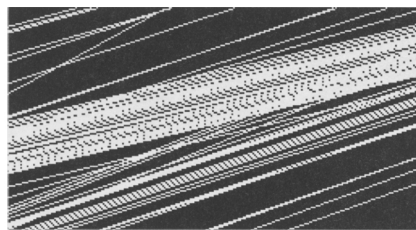
Fig. 5 An example of input sequence.

撮影はレールを引いて行い、撮影位置の補正処理 [4], [5] を施している。抽出された CG モデルから図 8 と同じカメラ同様のカメラパラメータを用いて生成した画像を図 9 に示す。複雑なオクルージョンにもかかわらず、梅と本殿、柱と神具などの前後関係が正しく再現されていることが観察できる。また、石畳の水たまりなど、通常の CG モデリングでは得がたい、忠実な画像生成が実現されていることがわかる。

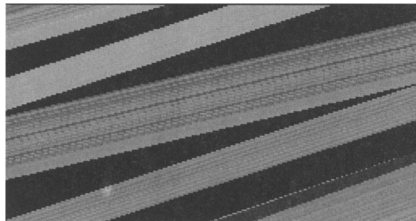
5. む す び

本論文では EPI 解析ベースの CG モデル自動作成法として、生成画像誤差最小化法を提案した。本手法では、生成される画像と入力画像との差が最小になる

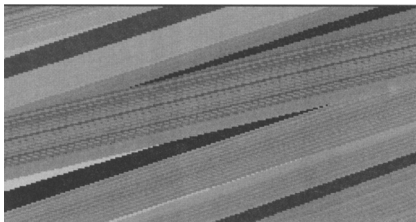
(注2): 可視スパンに接続する特徴直線については、付録 4. に示すような注意が必要である。



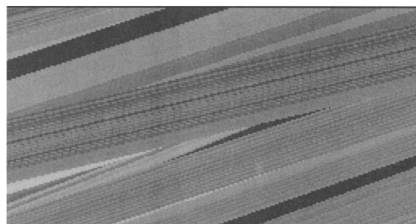
(a) Extracted feature line.



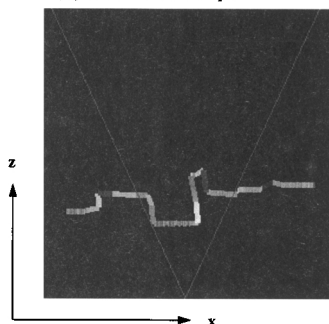
(b) The first loop.



(c) The second loop.



(d) The Third loop.



(e) The extracted 3D line segments and textures. The v-shape line indicates viewing frustum of the camera.

図 6 実験結果の例

Fig. 6 An example of the experimental results.

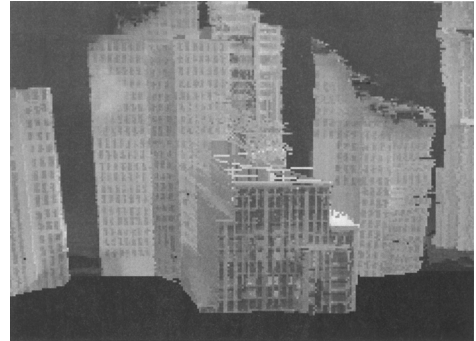


図 7 生成画像の例

Fig. 7 An example of the synthesized images.

ように CG モデルを入力画像列より再構成する。この最小化は、動的計画法 (DP) を繰り返し適用することにより、効率的に実現できることを理論的に示した。更に、実験により、視覚的に満足できる CG モデルが作成できることを実証的に示した。

本研究により、画像ベースの CG モデル作成に、大変明るい見通しを得ることができた。今後、本手法の実用化を目指し、

- カメラ運動の制限緩和
- 複数の映像から作成された CG モデルの統合などに取り組んでいく。

謝辞 撮影に多大な御協力を頂いた太宰府天満宮様に深謝する。また、研究開発にあたり御指導頂いた徳永幸生教授、曾根原登部長に感謝する。

文 献

- [1] 新谷幹夫, 杉山和弘, “実写ベースのコンピュータグラフィックス技術” 情報処理, vol.41, no.6, pp.676-681, June 2000.
- [2] R. Bolles, H. Baker, and D. Marimont, “Epipolar-plane image analysis: An approach to determining structure from motion,” International Journal of Computer Vision, vol.1, no.1, pp.7-55, 1987.
- [3] M. Shinya, T. Saito, T. Mori, and N. Osumi, “VR models from epipolar images: An approach to minimize errors in synthesized images,” Lecture Notes in Computer Science 1352 Computer Vision - ACCV '98, vol.II, pp.471-478, 1998.
- [4] 南田幸紀, 新谷幹夫, 曾根原登, “エビポーラ画像解析のための画像補正処理” 1998 信学ソ大, D12-71, 1998.
- [5] 南田幸紀, 新谷幹夫, 曾根原登, “エビポーラ画像解析のための撮影時刻補正処理” 1999 信学総大, D11-95, 1999.
- [6] 納富幹人, 全 炳東, 小澤史朗, “移動体観測による都市モデル構築” 信学論 (D-II), J81-D-II, no.5, pp.872-879, May 1998.
- [7] Z. Zhu, G. Xu, and X. Lin, “Constructing 3D natural



図 8 屋外シーン（太宰府）の例
Fig. 8 An example of out-door scenes (Dazaifu).



図 9 生成画像（太宰府）の例
Fig. 9 An example of synthesized images (Dazaifu).

scene from video sequences with vibrated motions,” Proc. IEEE VRAIS, pp.105–112, 1998.

- [8] T. Yasuno and S. Suzuki, “Occlusion analysis of spatio temporal images for surface reconstruction,” Proc. 4th British Machine Vision Conference, pp.549–558, 1993.
- [9] Y. Ohta and T. Kanade, “Stereo by intra- and inter-scanline search using dynamic programming,” IEEE PAMI, vol.7, no.2, pp.139–154, 1985.

付 録

1. 最適化の可分性

式 (15) の最小化における問題点は、領域をいくつか分割し、それぞれにおいて独立に最小化を行い、その和をもってその領域の最小誤差としている点である。一般には、 $X = \bigcup X_i, X_i \cap X_j = \emptyset$ for $i \neq j$ に対し、

$$\min_X h(S) \geq \sum_i \min_{X_i} h(S)$$

である。ここで、ある状態 S_0 (ここでは、正解の接続) がすべての領域で誤差の最小値を与えると仮定する。状態 S の領域 Y における誤差を $h(S|Y)$ と表せば、

$$\begin{aligned} \min_X h(S) &= h(S_0|X) \\ &= \sum h(S_0|X_i) \\ &= \sum_i \min_{X_i} h(S) \end{aligned} \tag{A.1}$$

が成り立ち、最小値を得ることができる。

2. 可視スパンによる分割

次の命題を証明する。「可視スパン vs の左に特徴直線 l が接続しているとき、主特徴直線 pl が vs の両側

で可視であることはない」この命題が成立すれば、主特徴直線は、これを挟む直近の可視スパンの間でのみ可視となり、他の領域では隠されることになる。

(証明) 図 A.1 のように AB 間で pl が vs と交差すれば、 pl は vs の右側で隠される。B より右で交差する場合には、 l とは交差しないので、左側では $vs-l$ に隠される。何となれば、もし l と pl が交差したとすれば、 p の傾きは l より小さくなければならないが、これは、 p が主特徴直線という仮定に反する。したがって、 pl はどちらか片方でしか可視でない。 □

3. 交差する可視スパンの非活性化

「可視スパン $vs2$ が可視スパン $vs1$ に隠され、かつ両側で可視であるとする。このとき、 $vs1$ はいかなる特徴直線とも接続できない」ことを証明する (図 A.2)。

(証明) $vs1$ が特徴直線と接続すると $vs1$ の右側若しくは左側で $vs2$ を隠すことになる。これは、可視であるという仮定に反する。 □

4. 接続スパンの分割

図 A.3 に示すように、可視スパン vs が l と l' と接続していると仮定する。また、 vs の両端の直線を v_1, v_2 とし、実空間で対応する点を V_1, V_2 とする。 l, l' に対応する点を L, L' 、その z 座標をそれぞれ、 z, z' とする。例えば、 $z < z'$ だとすれば、 L は vs の右側では、可視になることはない。したがって、この場合は、 l の接続が反対側の領域 X_2 に影響しない。しかし、 L' は vs の左側 X_1 で可視となる可能性がある。したがって、 l' の接続が反対側の領域に影響を与え得ることになり、都合が悪い。そこで、図に示すように、線分 V_2L' 上の点で左側から可視でない点 L_{ins} を選ぶ。これは、例えば奥行が z であるようにとることができる。

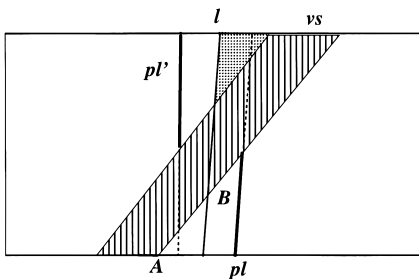


図 A.1 可視スパンは主特徴線の可視領域を分割する
Fig. A.1 Visible span terminates the visible areas of primal feature lines.

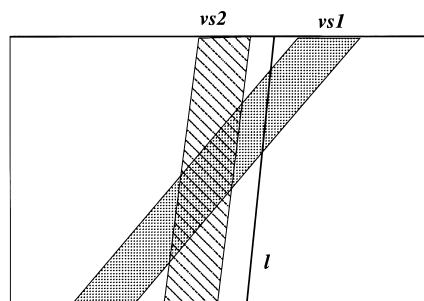


図 A.2 交差する可視スパン
Fig. A.2 Penetrated visible span.

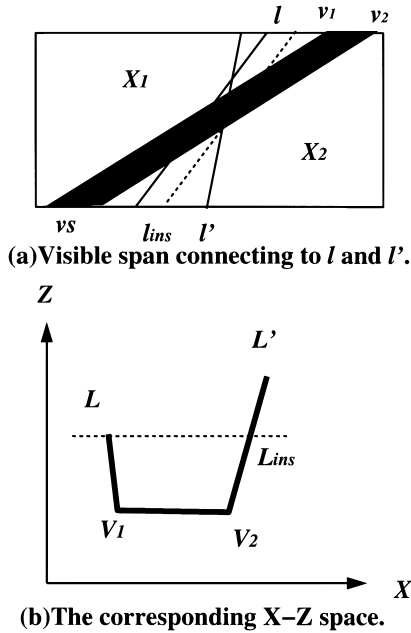


図 A-3 特徴線の挿入
Fig. A-3 Feature line insertion.

L_{ins} に対応する直線 l_{ins} を人工的な特徴直線として追加する。このようにすれば、 l 及び l_{ins} と vs との接続は、それぞれ片側からのみ可視となる。 l' の代わりに l_{ins} と vs の接続を決定し、 l' と l_{ins} の接続は次の最小化ループで決定することで、可分性を保ちつつ、最適化を実現することが可能となる。

(平成 12 年 9 月 18 日受付, 13 年 3 月 15 日再受付)



新谷 幹夫 (正員)

昭 56 早大・理工修士課程了。同年、日本電信電話公社入社。以来、文字認識の研究、コンピュータグラフィックスの研究に従事。昭 63~64 トロント大学客員研究員。平 7~9 日本電信電話(株)NTT ヒューマンインタフェース研究所カリフォルニアラボ勤務。現在、同社 NTT サイバーソリューション研究所主任研究員。工博。ACM 会員。



納富 幹人 (正員)

平 10 東京商船大大学院修士課程了。同年、日本電信電話(株)入社。以来、コンピュータグラフィックスの研究開発に従事。現在、同社 NTT サイバーソリューション研究所に勤務。



南田 幸紀 (正員)

平 6 東大修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。社内情報システムの開発に従事。平 8 より同社 NTT ヒューマンインタフェース研究所にてコンピュータグラフィックスの研究に従事。現在、同社 NTT サイバーソリューション研究所に勤務。



斎藤 隆文

昭 62 東大・工学博士課程了。同年、日本電信電話(株)入社、NTT ヒューマンインタフェース研究所勤務。平 9 東京農工大学工学部助教授、現在に至る。平 3~4 及び平 12 プリガムヤング大学客員研究員。専門はコンピュータグラフィックス、可視化、映像処理など。工博。情報処理学会、画像電子学会、ACM SIGGRAPH 各会員。