

NAIST-IS-MT0251107

修士論文

自然景観映像のレイヤー化に基づく
仮想空間の構築手法

保坂 茂利

2004年2月6日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

保坂 茂利

審査委員： 千原 國宏 教授
横矢 直和 教授
眞鍋 佳嗣 助教授

自然景観映像のレイヤー化に基づく 仮想空間の構築手法*

保坂 茂利

内容梗概

映像から写実的な3次元CGを生成することができれば、新しい鑑賞方法として、視点を自由に変更して臨場感に溢れた映像を楽しむことが可能になる。しかし、樹木や山などを含む自然環境を生成対象とした場合、テクスチャや形状が複雑なため、精密にモデリングを行なうことは容易ではない。臨場感のある自然景観を構築する場合に必要な要素として、物体の距離感と視点や視線方向の移動による自然景観の変化が表現できることの2つが重要であると考えられる。民生用のビデオカメラだけで上記の2点を実現できれば、簡単にインタラクティブな映像を楽しむことができる。そこで本研究では、単眼ビデオカメラで撮影した自然環境の映像から距離情報を保持したレイヤー構造を生成し、それを用いて実写に基づいた自然景観を立体的に提示するための手法を提案する。また、様々な自然環境映像に本手法を適用してその結果を確認する。

キーワード

自然景観, レイヤー構造, 距離情報, オプティカルフロー, 立体提示

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0251107, 2004年2月6日.

Synthesis of Layered Structure of Natural Scenery for Virtual Environment*

Shigetoshi Hosaka

Abstract

Realistic 3-dimensional Computer Graphics(CG) generated from natural scenery images allow us to enjoy the perspective from various viewpoints and angles freely. However, constructing realistic models for rendering natural objects such as trees, mountains, sky, waterflow and so on by computer graphics is still challenging task, since natural scenery has complexities in its shape and texture tremendously. This paper proposes a method for synthesising 3 dimensional natural scenery from video images recorded by single video camera. Using visual movements of the recorded objects, distribution of the depth from the camera can be acquired. Proposed method generates a layered structure according to the depth distribution in the scene so that the user can enjoy the perspective by changing the viewpoint and angle interactively in stead of just replaying the taped contents. Some experimental results applied for various recorded scenery are shown to clarify the effectiveness of the proposed approach.

Keywords:

Natural Scene, Layer Structure, Depth Information, Optical Flow, Three-Dimensional Presentation

* Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0251107, February 6, 2004.

目次

第1章 序論	1
1.1. 研究の背景と目的	1
1.2. 本論文の構成	3
第2章 実写映像を用いた自然景観の再現に関して	4
2.1. 従来手法	5
2.1.1 IBRによる自然環境再現	5
2.1.2 IBMRによる自然環境再現	6
2.2. 提案手法	14
第3章 実写映像のレイヤー化と再構成	16
3.1. レイヤー化	17
3.1.1 移動量分布による画像の領域分割	18
3.1.2 色相情報による画像の領域分割	21
3.1.3 レイヤー画像の統合	23
3.2. 映像空間の構築	25
3.2.1 表示するレイヤー画像の配置と生成	25
第4章 実験・評価	29
4.1. 実際に撮影した映像での実験	30
4.2. 実験に対する考察	43
4.3. 本手法を様々な映像に適用した場合	44
4.4. 考察	49
第5章 結論	50

謝辭	51
參考文獻	52

目次

2.1	QuickTime VR	6
2.2	EPI 解析 カメラ移動 (左) とその時のエピポーラ平面の画像 (右)	7
2.3	実画像と特徴点座標を用いた新しい視点からの画像の合成・入力	8
2.4	実画像と特徴点座標を用いた新しい視点からの画像の合成手法・出力	8
2.5	レリーフテクスチャマッピング:適用前	9
2.6	レリーフテクスチャマッピング:適用後	9
2.7	実画像を基にした樹木のモデリングに使用した原画像	10
2.8	実画像を基にした樹木のモデリング結果	11
2.9	Layered Depth Image	12
2.10	Yosemite valley が向日葵で覆われた場合の風景	13
2.11	小川のある風景	13
2.12	提案手法の処理のイメージ図	15
3.1	レイヤー化の流れ	17
3.2	ブロックマッチング	19
3.3	移動量のヒストグラム	20
3.4	フレーム間隔を変更前のヒストグラム (左) と変更後のヒストグラム (右)	20
3.5	移動量を用いた画像分割例 上:入力画像 下:分割されたレイヤー画像	21
3.6	色相情報で分割するレイヤー画像 (左) とレイヤー画像の色相情報をグレイスケール化した画像 (右)	22
3.7	色相情報を利用して画像を 3 分割した結果	22
3.8	セグメンテーション後の各レイヤーの統合と再形成	24
3.9	擬似中心射影のモデル	26

3.10	視線方向を変化した場合の領域の合成例	27
3.11	弱中心射影のモデル	28
4.1	映像を撮影した地点	30
4.2	映像を撮影した地点 (俯瞰図)	30
4.3	レイヤー化の結果	32
4.4	レイヤー化の結果	33
4.5	レイヤー化の結果	34
4.6	レイヤー化の結果	35
4.7	視線方向を左に動かした場合の画像	36
4.8	視線方向を左に動かした場合の画像	37
4.9	視線方向を右に動かした場合の画像	38
4.10	視線方向を右に動かした場合の画像	39
4.11	視点を左に，視線方向を右に動かした場合の画像	40
4.12	視点を左に，視線方向を右に動かした場合の画像	41
4.13	視点を前に，視線方向を左に動かした場合の画像	42
4.14	視点と視線方向をともに右に動かした場合の画像	42
4.15	レイヤー化の結果 (電車の車窓風景)	45
4.16	レイヤー化の結果 (若草山・車の車窓から)	46
4.17	レイヤー化の結果 (平城京跡・手動)	47
4.18	映像空間の構築結果の画像	48

表 目 次

4.1	使用したカメラの諸元	30
4.2	様々な映像のレイヤー化に要した処理時間	44

第1章 序論

1.1. 研究の背景と目的

近年の映像メディアはデジタル化の普及が進んでいる。例えば TV 放送では、従来の BS, CS の衛星放送に加え、地上波のデジタル放送も 2003 年の 12 月から開始している。民生用のビデオカメラもデジタル映像が主流となり、家庭で日常的に用いられている。また、デジタルハイビジョン放送をはじめとした高精細な映像も一つの映像メディア形態として根付きつつあり、デジタルスチルカメラの市場に至っては、画素密度の向上は機器の小型化と合わせて尽きない競争を続けている。

加えて、ハードディスク (HDD) の大容量化、DVD ドライブやレコーダ、記録メディアの低価格化に見られるように、映像をデジタルデータとしてそのまま記録する利便性も高まっている。さらに、特別な映像機材を持ち込まなくても、一般に普及している PC (パーソナルコンピュータ) に映像データを取り込み、編集や加工を任意に行なった上で、メディアに書き込んで自由に再生したり保存したりすることが可能である。このように、映像関連技術の発達により、今まではなかった映像の楽しみ方が生まれつつある。

HDD などのデータのランダムアクセスが可能なデバイスに保存しているデジタル映像を観賞する際には、自由に再生ポイントを選択でき、動画の 1 シーンを取り出して静止画を生成してもアナログ映像にくらべて劣化のない画像が得られる。しかし、基本的には撮影された状態の時間軸に沿った再生しかできない。また、映像は平面的なものでしかないために撮影された空間を知覚することは難しく、立体感や臨場感に欠ける場合がある。例えば、山や森などの自然の中を散策するような TV 番組、または自分や他人が撮影した風景の映像を見ていて、「画面

に写っている風景を好きな視点で眺めてみたい」と思ったことはないだろうか？映像を好きな視点で眺める，というインタラクティブな操作を行なうことができれば，撮影された「空間」をよりよく知覚できるようになる．撮影された「空間」が知覚できるようになれば，映像から得られる立体感や臨場感は飛躍的に増大するだろう．

撮影した映像から，好きな視点で眺めることのできる「映像空間」を実現するためには，撮影した映像内の環境を3次元的に再構成するなどして，新しい視点からの画像を表現する必要がある．現在まで，実写の映像や画像を用いて新しい視点からの画像を表現するといった研究が多数行われている．あらゆる視点から実写画像を取得して新しい視点に応じて提示する Image-Based Rendering (IBR) や画像から物体の3次元形状を求める Image-Based Modeling (IBM) ，これらの両方の手法を併せた Image-Based Modeling and Rendering (IBMR) と呼ばれる手法があり，再現したい対象とその用途に合った手法を選んで使うことになる．しかし，植物や遠くの山々などを含むような自然景観を対象とした場合，それらのテクスチャや形状の複雑さのために，正確な距離や特徴点を求めることが難しい，遠くの大きな物体は計測できない，正確にモデリングするにはレンジファインダなどを用いて3次元情報を精密に計測することが必要，などのために自然景観の再構成には大きな制約が掛かってしまう．

実際の自然風景に存在する物体の3次元情報やテクスチャの情報を計測し，それらのデータに基づいてPCで自然環境を再構成し，ディスプレイ上に様々な視点から見た自然景観CGを再現することを，本論文では「自然景観の再現」と呼ぶ．ここで，映像から臨場感のある自然景観の再現を行なう場合に必要とされる要素として，被写体同士の奥行きの違いが表現できることと視点の移動や視線方向の移動による自然景観の変化が表現できることの2つが重要であると考えられる．これを，ビデオカメラ1台で撮影した自然景観映像から実現することができれば，自分が撮影した映像を使って立体感があり，視点の移動もできる自然景観CGを簡単に作成でき，立体感や臨場感にあふれた自然景観の鑑賞が可能になる．そこで本研究では，単眼ビデオカメラで収めた実画像を用いることで，自然物のテクスチャをありのままに表現し，立体感と臨場感を出すために動画像のフレーム間で

の物体の見かけの動きから奥行き情報を抽出することによって3次元情報を持った自然景観CGを簡易に作成し，視点変化にも対応可能な提示手法を提案する．

1.2. 本論文の構成

本論文では，まず序論において研究の目的とその背景について述べた．第2章では，映像を用いた自然景観の再現に関する先例研究と提案手法を述べる．その後，提案手法の詳細として，第3章では撮影した映像からレイヤー構造を生成するための手法と，その手法によって生成された映像を用いた映像空間の構築手法について述べる．そして，第4章で提案手法を用いて様々な映像からの映像空間の構築と評価を行い，最後に，第5章で結論を述べる．

第2章 実写映像を用いた自然景観の再現に関して

3次元の空間や物体のコンピュータ上での表現は，CADソフトや3-Dimensional Computer Graphics(3DCG)ソフトなどを使ってデザイナーが人手でモデリングを行うのが現在の主流である．しかし，この方法ではデザイナーの技術やモデリングに長い時間が必要になるという問題がある．そこで，実際の環境や物体を計測することでコンピュータ上での表現を自動化しようとする試みが多数なされている．実写画像や映像をベースとした，2次元画像から3次元空間をコンピュータに認識させるという研究が，コンピュータビジョン (Computer Vision:CV) の分野で行われている．また，それとはちょうど反対に，3次元モデルをベースに2次元の画像を生成するという研究がコンピュータグラフィックス (Computer Graphics:CG) の分野で行われてきた．そして現在では，CVでの手法にCGでの手法を加えた，即ちCVの手法を用いて2次元画像から3次元の空間や物体をモデリングした後，CGの技術を用いて新しい視点での画像をレンダリングするという研究が盛んになっている．

本章では，実写映像を用いて自然景観CGを作成するという課題に対する従来手法を紹介し，それらを踏まえた上で本研究における提案手法について述べる．

2.1. 従来手法

実写映像をベースとした自然景観 CG の作成の自動化に関する従来手法として Image-Based Rendering (IBR) という手法がある。また、画像から 3 次元モデルを生成する Image-Based Modeling (IBM) と IBR 手法を組み合わせた Image-Based Modeling and Rendering (IBMR) 手法も研究されている [11, 19, 21]。現状では、最終的に CG として出力するために用いられる IBM の手法は、ほとんどが作成したモデルに対して実際に撮影した画像をテクスチャとして貼り付けてから CG を出力するため、純粋な IBM 以外は IBRM に含まれる。そのため、本節では IBR と IBRM の二つの手法について説明する。

2.1.1 IBR による自然環境再現

IBR とは、3 次元情報を持ったモデルを用いずに、多くの視点であらかじめ取得しておいた実写画像を用いて任意の視点から見える画像を提示する手法である。そのため、モデルベースのレンダリング手法よりも簡単にリアリティの高い CG を得ることができる。IBR を実現した初期のアプリケーション例として QuickTime VR [2] がある。この手法では、カメラを回転させて撮影する、または普通に撮影した画像を繋ぎ合わせることによって円筒形のパノラマ画像を生成し、観察者の望む視線方向の画像をそのパノラマ画像の一部を変形することによって生成する (図 2.1)。しかし、この手法では観察者は周りを見回すことはできるが、一つの位置からしか撮影していないために視点位置を変更することは出来ない。そのため、画像内で他の物体によって隠されている部分は表示することが出来ない。それに対して、視点の移動も考えたのが Light Field Rendering [8] や Lumigraph [6] などの手法である。これらの手法ではカメラを 2 次元的に配列して画像を取得することによって、平面的な視点移動を表現することができる。これをさらに周囲 360 度を見回すことができるように拡張したのが同心モザイク [14] である。しかし、これらの IBR 手法を自然景観の再現に使用する場合、カメラ移動を制御する必要があり、また、画像を保存する容量も大きいいため実用化には至っていない。



図 2.1 QuickTime VR [2] 上:パノラマ画像 下:観察者の視点から見える画像

2.1.2 IBMR による自然環境再現

Image-Based Modeling and Rendering (IBMR) とは、2次元画像から3次元幾何情報を抽出するための Image-Based Modeling (IBM) 手法と IBR 手法を組み合わせた手法である。この手法では、取得した映像や画像から物体の3次元形状や撮影した環境のモデルを復元した後、そのモデルに取得した実写画像をテクスチャとしてマッピングしてレンダリングを行う。入力画像から3次元情報や奥行きを求めて利用するため、新しい視点からの画像をレンダリングすることが比較的容易にでき、IBRのように膨大な画像データを保存しておく必要も無くなるという利点を持つ。

マルチベースラインステレオ法 [10] では、位置と姿勢が既知の複数カメラから得られた画像を用いる。基準画像の各画素において、他の全ての画像における投影画素との類似度の和が最大になるように奥行き値を設定する。このため、ある画像ではオクルージョンが生じていても、残りの画像で生じていなければ奥行きが正しく計算され得る。詳細なデプスマップが得られるので面の再構成に有利で

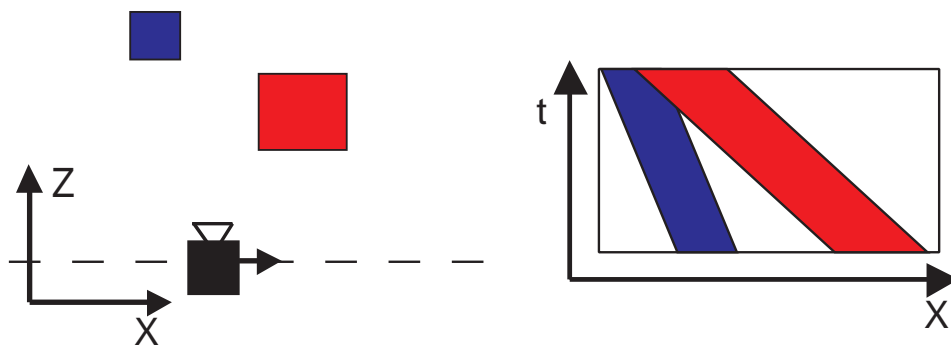


図 2.2 EPI 解析 カメラ移動 (左) とその時のエピソード平面の画像 (右)

ある。

Epipolar-Plane Image (EPI) 解析 [1] では、カメラの視軸を固定して真横に移動する (図 2.2 左) と、画像内の物体の移動速度は奥行きに反比例するという性質を利用して 3 次元形状を復元する。奥行きは、カメラの移動に伴うエピソード線上での画像の変化を時間軸に沿って繋げた画像 (図 2.2 右) を新たに生成し、その画像でのエッジの傾きから求められる。横方向の接続関係を求めやすく、オクルージョンの処理が容易であるという利点を持つ。Yamazaki ら [15] は EPI 解析により求めた距離に応じて、建物の表面を平面などの簡単な形状の組み合わせとして生成し、それに実写画像をテクスチャとして貼り付けることによって都市環境を再現するという手法を提案している。しかし、3 次元形状の復元には緻密な画像シーケンスが必要である。そのため、カメラを光軸に垂直にして等速直線運動することが前提となり、カメラの移動に強い制限が掛かる。この制限を緩和する手法 [22] などもあるものの、画像内の特徴点を追跡する必要があるため、特徴点の検出が難しい自然風景に適用するのは困難である。

以上の手法では入力画像のみから 3 次元形状を復元しているが、撮影した画像に対応する環境の奥行きや物体の 3 次元情報をレーザーレンジスキャナなどの計測機器を使って求め、その幾何情報と実写画像を利用して環境を再現する手法も広い意味での IBRM 手法に含まれる。Yakup Genc ら [5] は、あらかじめ 3 次元情報が分かっている実写画像中の特徴点と視点位置との関係を用いて、新しい視点



図 2.3 入力画像 [5] 原画像 (左) と特徴点の幾何情報を画像化した画像 (右)



図 2.4 少し右から見たときの出力画像 [5]

から見た画像を 3 次元形状の復元は行なわずに表現する手法を提案している (図 2.3, 2.4) . また , レリーフテクスチャマッピング [9] という手法では , 入力画像とそれに対応する詳細な奥行き情報を使って 3 次元的な表面を作成することによって立体的な表示を実現している (図 2.5 , 2.6) . 上図はある視点から単純なテクスチャマッピングを行なってレンダリングした画像であるが , 下図は上図と同じ視点でレリーフテクスチャマッピングを使用してレンダリングした画像である . 両方の画像とも同じ数のポリゴンを使用している . レンガや出窓 , 屋根の部分にレリーフテクスチャマッピングの効果がよく表れている . しかし , 環境を復元するために計測機器を用いる場合は , その分測定が複雑になってしまう . また , それ



図 2.5 レリーフテクスチャマッピングの適用前 [9]



図 2.6 レリーフテクスチャマッピングの適用後 [9]



図 2.7 樹木のモデリングに使用した原画像 撮影角度が 90 度 (左) と 0 度 (右) [20]

らを使ったとしてもピクセル単位で情報の欠損が起きる場合があるために 3 次元情報の取得は難しい。例えば，レーザーレンジスキャナなどのレーザを使って計測を行う機器では，対象の反射特性や色による影響や，計測分解能の制約などによって，データが欠落してしまうピクセルが存在する。

復元対象があらかじめ限定されている場合，形状の特性を考慮した簡単な 3 次元モデルを利用して再現するという方法もある。例えば，対象が建造物である場合は，直方体や角錐などの基本的な形状が多いため，これらを組み合わせることによって人手でもあまり時間を掛けずに形状をモデリングできる。Devevec ら [3] は直方体などの単純な形状を組み合わせた 3 次元モデルを元にして，画像とそのモデルとで対応する点を与えることによってモデルを変形し，画像に似た形状の 3 次元モデルを生成する手法を提案している。また，対象が植物の場合は，L-system [18] に代表されるフラクタルによる生長規則や，植物のホルモンや環境の影響を考慮した生長モデル [17] 等を用いることによって植物の形状モデルを生成し，それを利用する。坂口ら [20] は複数の樹木の画像から形状の拘束条件を求め，その条件下での単純な枝の分岐規則により樹木モデルを生成し出力画像を得ている (図 2.7, 2.8)。しかし，復元対象を限定する手法や単独の対象物しか再現できない手法では，自然景観全体を再現するためには作成した 3 次元モデルをさ



図 2.8 樹木のモデリング結果 [20]

も自然であるかのように配置することによって表現するしかない。

そこで，Shadeら [12, 13] は，実写画像や距離画像，物体の3次元形状などからある仮想的なカメラ視点での画像である Layerd Depth Image (LDI) を生成する手法と，植物モデルを利用して作成した小さな LDI を多数用いて配置することによって自然景観のリアルタイムレンダリングを実現する手法を提案している (図 2.10) 。LDI では仮想的なカメラ視点から各視線につき複数のサンプル点があり，それぞれの点が色情報や距離情報を保持している (図 2.9 参照) 。レンダリングを行なうときには，それらのサンプル点の中から視点の位置に応じて表示するサンプル点を決定する。Deussenら [4] は，地面や川，山などの地形を作ってから人力や生長規則を用いて作成した植物モデルを配置することによって，生態系を利用した自然景観のレンダリング手法というものを提案している (図 2.11) 。

自然風景を撮影した映像から自然景観を再現するためには，本節で述べてきた従来の IBRM 手法をそのまま適用するには難点がある。なぜなら，テクスチャが複雑なために，画像だけから特徴点や対応点を求めて一貫した3次元情報を求め

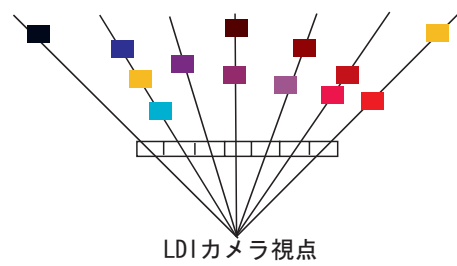


図 2.9 Layered Depth Image

ることは困難であるからである。また、3次元形状を計測する装置を使用する場合には、対象の反射特性や色による影響や計測分解能の制約などによって、ピクセル単位でデータの欠損部分が生じるために見た目に良い出力画像を得られない。簡単なモデルや生長規則を使う手法では、一つとして同じ物のない自然物の多様性や実在感を表現することは困難であるという問題を抱えている。



図 2.10 Yosemite valley が向日葵で覆われた場合の風景 [12]



図 2.11 小川のある風景 [4]

2.2. 提案手法

民生用のビデオカメラを手動でラフに平行移動させて撮影した映像から，被写体同士の奥行きの違いの表現と視点の移動や視線方向の移動による見え方の変化が表現できる自然景観 CG をレンダリングできれば，簡単に撮影した映像や既に撮影している映像を用いて立体感や臨場感のある映像空間が生成できるようになり，映像の新しい利用方法も生まれてくると思われる．しかし，それらの表現を実現するためには，従来の IBR や IBMR では

- カメラを決まった位置に設置しなければならないために特定の場所でしか撮影できない
- カメラの動きを制御する必要がある
- 自然物体のテクスチャや形状が複雑なために，画像だけから一貫した 3 次元情報を求めることは困難
- 環境の 3 次元情報を計測する装置では，対象の反射特性や色による影響，計測分解能の制約などのためにデータの欠落が起きる

などという問題や制限が存在するために，手動でラフに平行移動させて撮影した映像からの自然景観の再現は難しい．

そこで本研究では，撮影された映像内での物体の見かけの移動量の違いから実際の距離関係を求める．映像上での移動量の違いを用いて画像内の被写体をいくつかのレイヤーに分割し，ユーザの視点や視線方向に応じて分割した画像を配置することによって，撮影した範囲内である自然景観を現実の距離関係を保った CG として再現するという手法を提案する．その際，本手法では単眼ビデオカメラ 1 台を用い，手動で平行移動させて撮影した自然景観の画像シーケンスを用いて移動量を求める．この手法により，物体同士の奥行き表現と視点の移動や視線方向の移動による見え方の変化が表現できる，写実的な自然景観の再現が可能となる．また，3 次元情報を計測する装置やカメラの位置や動きを一定にするための装置などを用いずに映像を撮影でき，計測時のカメラ運動の制限を減らすことができる．本手法では，画像シーケンスからレイヤー構造を生成する処理であるレ

イヤー化を行った後に映像空間の構築を行って自然景観を再現する．提案手法の流れを図 2.12 に示す．

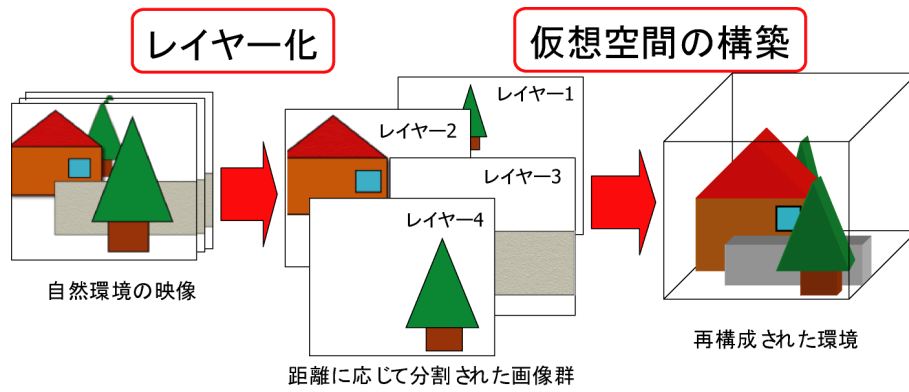


図 2.12 提案手法の処理のイメージ図

第3章 実写映像のレイヤー化と再構成

本章では、まず画像シーケンスから距離情報を保持したレイヤー構造を生成する処理について説明し、次に、レイヤー化によって生成される距離情報を保持した画像（以下レイヤー画像とする）を利用した映像空間を構築する方法について説明する。

本手法では、単眼カメラを平行に移動させて撮影したフレーム間での各物体の見かけの移動量をオプティカルフロー [7, 16] の計算で求め、求めた移動量と実際の奥行きと対応付けることによって物体の奥行き情報を取得する [23, 24]。本研究では自然風景を対象としているため、比較的遠い距離に存在する山や空などの対象も含む。遠い距離に存在する対象に対しても距離情報を持たせるために、領域分割の結果に基づき、いくつかの大まかな奥行き毎にレイヤーを生成する。その後、生成したレイヤーに対して距離に応じた提示手法を用い、新しい視点からの画像を生成する。

以上の手法により、ビデオカメラで撮影された映像から、物体同士の奥行きの表現と視点の移動や視線方向の移動による見え方の変化が表現できる写実的な自然景観の再現を実現する。

3.1. レイヤー化

比較的遠い距離に存在する山や空などの対象を含む自然風景映像を入力画像として、映像上の移動量を求めて各フレーム画像をいくつかのレイヤー画像に分割した後、色相情報による領域分割を行う。最後に各レイヤーを、移動量と色相情報を統合的に判断、整理することによって、移動量検出の失敗やオクルージョンの影響によって生じる孤立領域などもいずれかのレイヤーに統合する。この処理を全ての画像シーケンスに適用することにより、自然風景映像に対して網羅的に奥行き情報を付加する。

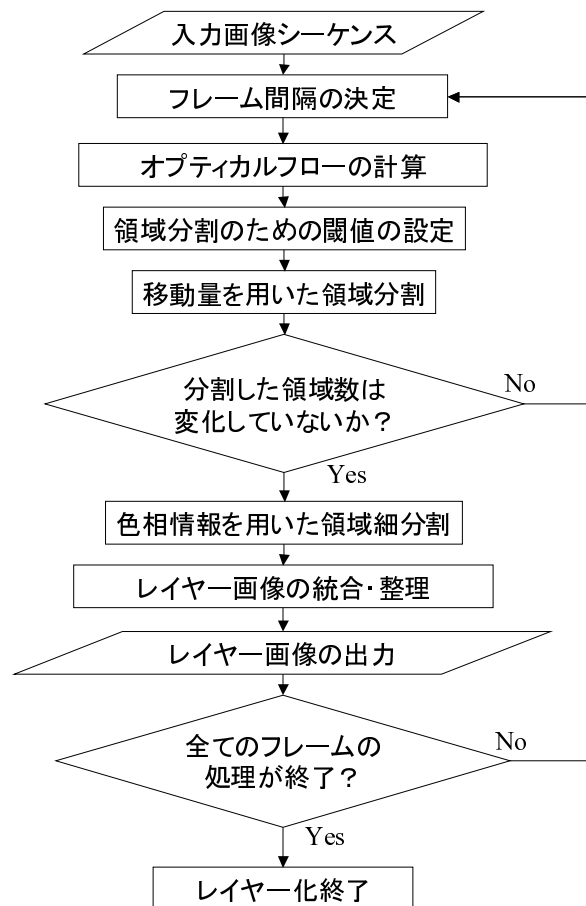


図 3.1 レイヤー化の流れ

3.1.1 移動量分布による画像の領域分割

カメラを撮像面に対して平行に移動させながら撮像することで得られる映像上では、カメラの移動にともない、カメラに近い物体ほど大きく位置が変化し、遠い物体ほどその変化は小さくなる。位置が大きく変化するという事は、映像のフレーム間での移動量が大きいということである。従って、カメラから各物体までの実際の距離の違いは、映像における各物体の移動量の違いであると見なすことができる。そこで、本手法では映像のフレーム間での各小領域の移動量をオプティカルフローを計算することにより求め、求めた移動量のヒストグラムを利用して動的に閾値を設定し、移動量分布による画像の領域分割を行って画像を分割する。

オプティカルフローによる移動量の決定

映像のフレーム間での各小領域の移動量はオプティカルフローを計算することで求める。本研究では、オプティカルフローの計算方法としてブロックマッチング法を採用した。ブロックマッチング法では、ある基準フレームにおいて任意の大きさのテンプレートを設定し、次フレームにおいてそのテンプレートと最も似ている領域を探索・決定する。その際にテンプレートがどれだけ動いたかを各小領域の移動量とする。全ての画像内の領域でこの処理を行うことによって、各フレーム間の画像領域全体の移動量を求める。本手法では、カメラを平行移動させて撮影した映像を用いるので、映像上での物体は上下に大きく動くことはない。そこで、テンプレートの上下方向の探索範囲を狭めることで、オプティカルフローの計算時間を短縮することができる。

動的な閾値の設定

オプティカルフローの計算によって求めた移動量を、動的に設定した閾値で分割することで、入力画像をいくつかのレイヤーに分割する。オプティカルフローの計算によって求めた移動量のヒストグラム (図 3.3) を利用して、領域分割に用いる閾値を決定する。決定手順は以下のようになる。

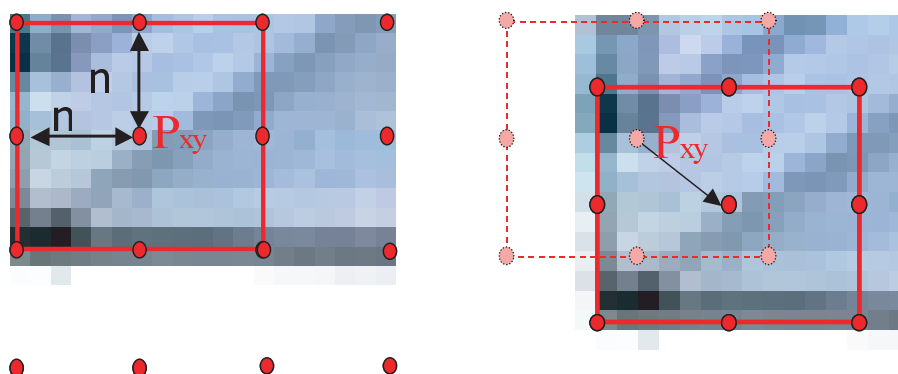


図 3.2 ブロックマッチングの基準フレーム (左) と次フレーム (右) でのテンプレートの移動例

1. 移動量ヒストグラムの度数が一定値以上となる移動量を探索する
一定値はカメラの移動速度を考慮して決定する．今回は，移動量の累計度数を移動量の項目数 (移動量が 0 から 20 までの 20 項目) で割った値とした．
2. 度数が一定値以上となる連続した移動量の中で，度数が極大値となる移動量を探索する
3. 度数が極大値となる移動量の間で，度数が最小となる移動量を一つ探索し，その移動量を閾値とする

連続するフレーム間では移動量の分布は大きく変化することはないと考える．そのため，もし求めた移動量のヒストグラムが前のフレームで求めたヒストグラムと比べたとき，閾値が急激に変化していたり，閾値の個数が増減した場合には，移動量を計算するフレーム間隔を変更して計算をやり直す．図 3.4 の左はフレーム間隔を変更する前のヒストグラムであり，移動量を計算するフレーム間隔を一律に 3 フレームとしている．この場合，グラフ奥の 18 フレームから 30 フレームの間で丸で囲まれた部分において極大値の数が減少してしまい，分割される領域の数が変化してしまう．そこで，18 から 30 フレーム間で移動量を計算するフレーム間隔を広げて計算し直したのが右図のヒストグラムである．この処理により，一

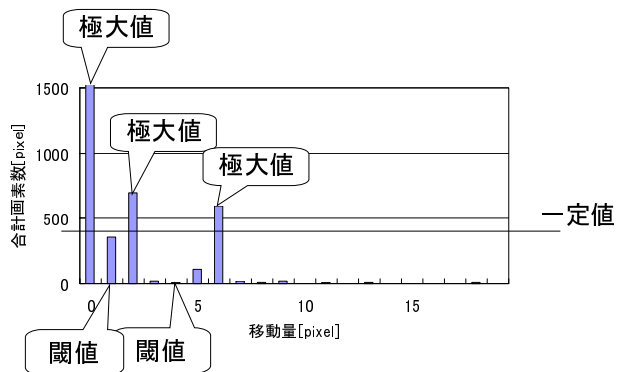


図 3.3 移動量のヒストグラム

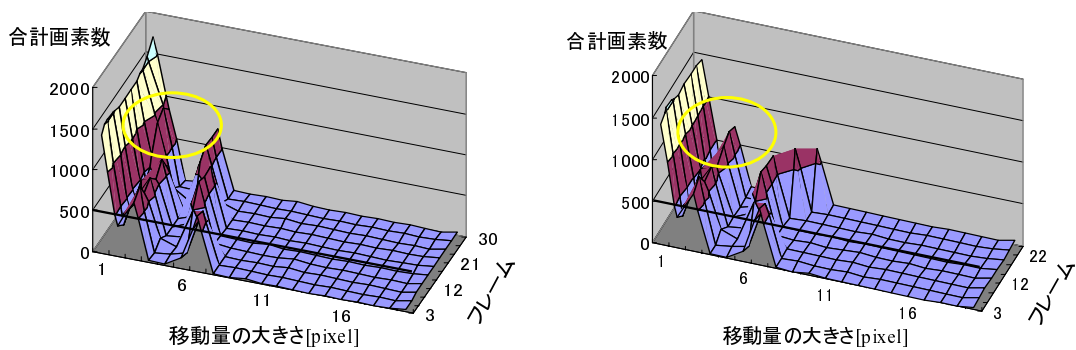


図 3.4 フレーム間隔を変更前のヒストグラム (左) と変更後のヒストグラム (右)

時的なカメラのブレなどによる影響で分割数が変化することを防ぐことができる。

移動量を用いた領域分割

以上の処理によって求めた閾値を使って、領域分割を行なう。入力画像を各レイヤーに分割した例を図 3.5 に示す。図の上の画像が入力画像であり、下の画像は移動量に応じて領域を分割した結果のレイヤー画像である。左の画像が最も移動量が大きい領域であり、最も右の画像は移動量が無いか求められなかった領域である。これらの画像より、入力画像の画像領域がレイヤー画像の領域のいずれかに含まれているのが分かる。



図 3.5 移動量を用いた画像分割例 上:入力画像 下:分割されたレイヤー画像

3.1.2 色相情報による画像の領域分割

自然物体は彩度が高く、人工物や空は逆に彩度が低い場合が多い。そこで、移動量を利用して領域分割したそれぞれのレイヤー画像で、各画素の色を RGB 色空間での値から HSV 色空間での値に変換し、色相成分の値に応じてレイヤー画像をさらに細かく分割する。ただし、色が白や黒などの彩度が低いグレイスケール

となる画素は色相値を持たないため、それらの画素では色相情報による領域分割を行わない。色相情報を利用してレイヤー画像を3つの領域に分割した画像を例として示す(図3.6, 3.7)。図3.6の左が分割するレイヤー画像で、右がその色相情報をグレースケールに変換したときの画像である。建物と木々の色相値が明確に分かれていることと、空の部分にあたる白い領域は彩度が低く色相情報を持っていないことが右の画像からわかる。これらの色相情報に対して任意の閾値を設定してレイヤー画像を領域分割することによって、図3.7に示すような出力画像を得る。

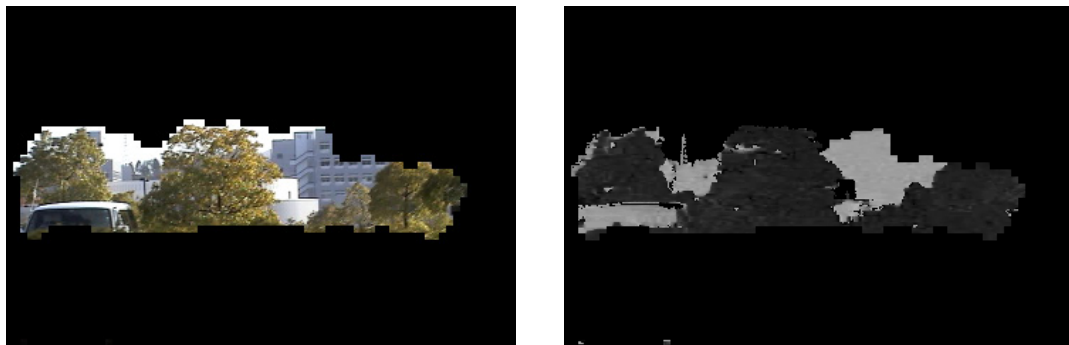


図 3.6 色相情報で分割するレイヤー画像 (左) とレイヤー画像の色相情報をグレースケール化した画像 (右)



図 3.7 色相情報を利用して画像を3分割した結果

3.1.3 レイヤー画像の統合

移動量と色相情報を利用して入力画像を領域分割した後、レイヤー画像の統合を行う。まず、色相情報によって分割されたレイヤー画像の各画像領域を、他のレイヤー画像で分割された似たような色相値を持った画像領域と統合する。その後、各レイヤーの孤立している小領域でそれぞれ独立に色相値と移動量が似た領域を他のレイヤーから探し、大きい領域を形成するように分離・結合を行なうことにより、各レイヤーを再形成する。この操作によって、オプティカルフローの計算時のマッチングエラーや、オクルージョンの影響によって移動量が求められなかったために生じる孤立領域などをいずれかのレイヤーに統合し、入力画像に対して網羅的に移動量を付加したレイヤー画像を生成することが出来る。図 3.8 に、この処理の例を示す。図 3.8 の中央左の 3 枚の画像は、各レイヤー画像を色相情報によって分割した結果の画像から同じ色相情報を持つ領域を抽出した画像であり、中央右の画像がそれらを統合した結果の画像である。そして、統合した画像に対して小領域を分離・統合してレイヤーを再形成した結果が右端の画像である。この処理によって、移動量で分割したときに別々のレイヤーとして分割されてしまった物体や領域を一つのレイヤーとして再形成することができる。

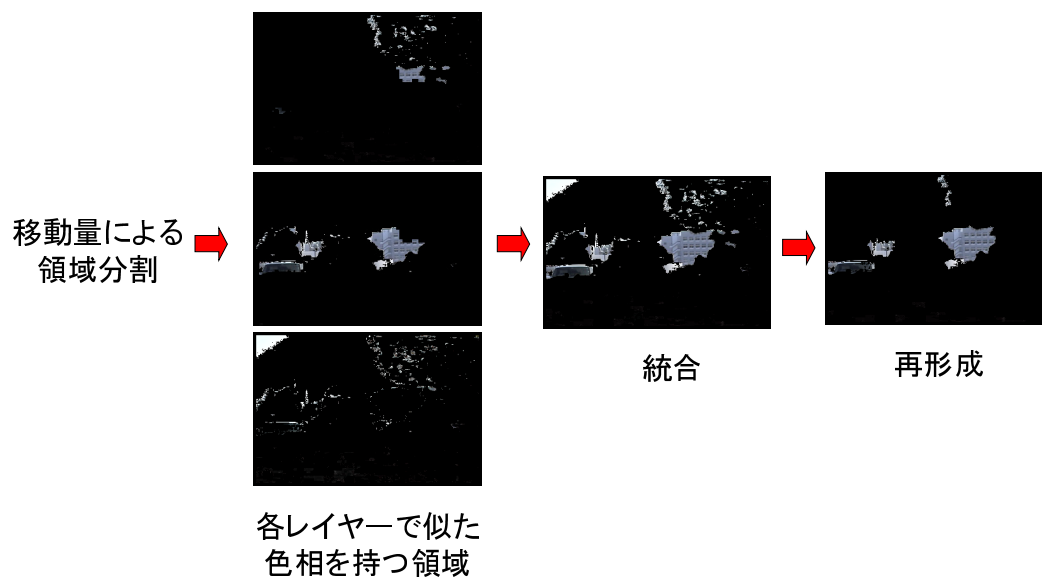


図 3.8 セグメンテーション後の各レイヤーの統合と再形成

3.2. 映像空間の構築

本節では、移動量を保持したレイヤー画像を用いて、物体同士の距離感と視点変化による画像の変化を表現するための画像の提示手法について述べる。レイヤー画像を生成した後、それぞれの距離に応じた場所にレイヤー画像を配置することによって映像空間の構築を行ない、出力画像を得る。

3.2.1 表示するレイヤー画像の配置と生成

新しい視点からの画像は、その視点の位置と視線方向に応じて各レイヤー画像を選択・合成して提示する。画像の配置と合成手法は次のようになる。

1. 基準となるレイヤーを決める
2. 基準レイヤーに任意の距離の値を付加する
3. 各レイヤーに付与されている距離情報を使って、基準レイヤーから他のレイヤーまでの相対的な距離を求める
4. 各レイヤーの距離を決定し順番に並べる
5. 視点位置と視線方向を決定する
6. 視点との距離に応じて各レイヤー画像を提示する

それぞれのレイヤーの提示方法を、視点からレイヤーまでの距離が近いものと遠いものの2種類とし、どちらかを適用してレイヤーの提示を行なう。

視点からの距離が近いレイヤー

視点からの距離が近いと見なされるレイヤーは、視点位置の変化による物体の見え方の変化が大きく、視点によっては物体の正面だけでなく側面が見えたりするため、擬似中心射影 (図 3.9 参照) で表現されると仮定する。擬似中心射影では、物体の見え方に反映される要素として、物体と視点との距離と光軸と物体との距離の 2 つがある。物体は、物体の重心を通り画像平面と平行な投影面に対して、視点と物体重心を通る直線に対して平行に正射影された後、視点と投影面との距離に応じて画像平面に中心射影される。視点位置の変化によって視点から物体重心までの距離が変化すると、投影面への正射影の方向も変化するため、視界内の物体の大きさが変化したり、物体の見え方が変わって側面が見えたりする。そこで、視点からの距離が近いレイヤーではこの 2 点を表現するために、視点位置や視線方向の変化に応じて各フレームのレイヤー画像を合成して表示する。実際の表示時の処理を以下に述べる。

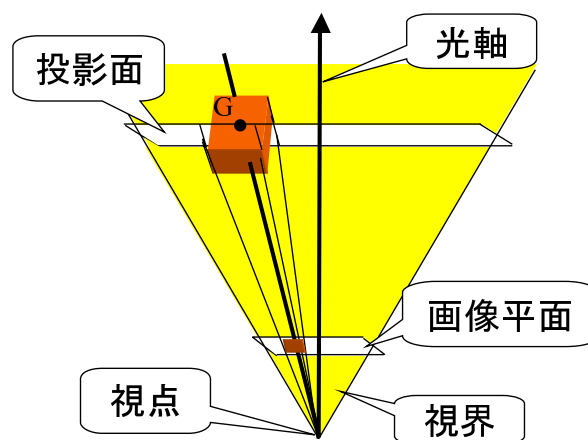


図 3.9 擬似中心射影のモデル

各レイヤー画像を距離に応じて配置した後、視点位置が前進する場合には、レイヤーを中心射影して拡大表示をする。後退する場合は、レイヤーとの距離が離れるために視点位置から見える領域が広がる。そこで、それまで表示していた

レイヤーの両端に、前後のフレームの同じ距離情報を持ったレイヤー画像から新しく見える領域を追加して合成することによって、拡大したレイヤー画像を表示する。左右に視点位置が移動する場合は、視線方向が変化しないため、視界の端に新しい領域が見えた場合にのみ、後退時と同様に隣接するフレームの領域を追加して表示する。また、視線方向が左右に回転する場合には、注視方向に新しい領域が表れるので、その領域に画像を追加して合成する。しかし画像を合成する際に、カメラの画角外の領域は撮影されていないため、正確な画像を表示することは出来ない。その場合は、新しく見える領域を正確な画像に近い画像で補間するために、視点位置を後退したときと同じように、前後のフレームのレイヤー画像の領域を追加して、拡大したレイヤー画像を表示する。(図 3.10 参照) これらの処理を組み合わせることによって、視点位置や視線方向の変化に対応したレイヤー画像を生成して表示する。

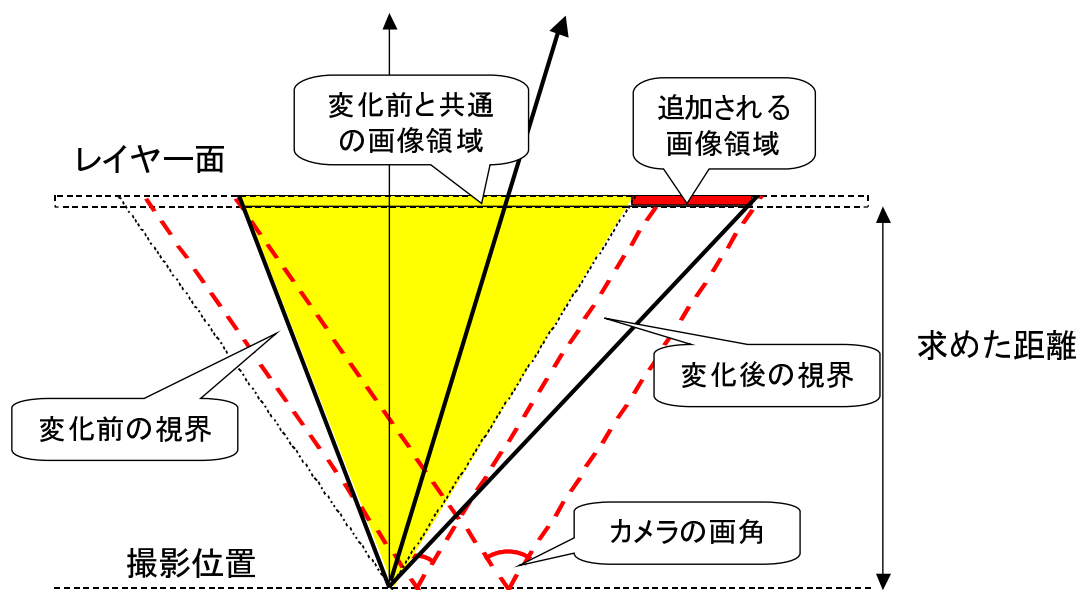


図 3.10 視線方向を変化した場合の領域の合成例

視点からの距離が遠いレイヤー

視点からの距離が遠いと見なされるレイヤーは、視点の位置の変化による物体の見え方の変化が小さく、ほぼ物体の正面しか見えないため、弱中心射影(図 3.11 参照)で表現されると仮定する。弱中心射影では、物体の見え方に反映される要素は、物体と視点との距離だけである。物体は、物体重心を通る投影面に対して光軸と平行に正射影された後、視点と投影面との距離に応じて画像平面に表示される。そのため、視点との距離によって物体の大きさは変化するが、光軸との距離は見え方に影響しない。実際の表示時の処理として、弱中心射影と仮定するレイヤーは、領域分割によって得られたレイヤー画像からパノラマ画像を合成して表示する。パノラマ画像は、移動量による領域分割の時に求めた移動量を利用して合成する。

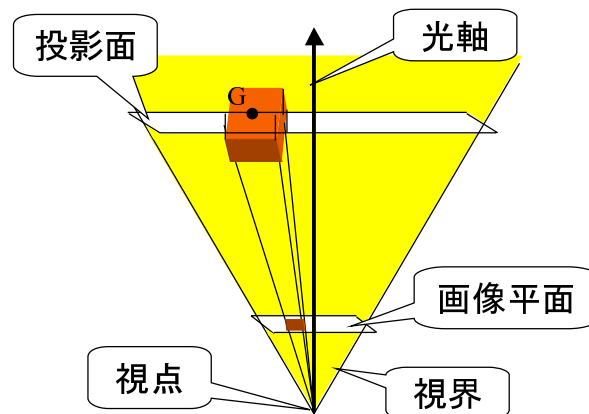


図 3.11 弱中心射影のモデル

第4章 実験・評価

本章では，第3章で述べた提案手法を用いて，実際の自然風景映像のレイヤー化と映像空間の構築を行い，視点や視線の変化によるコンピュータ上で再現した自然風景の見え方の変化と実際の自然風景での見え方の変化を比較する．また，様々な自然風景映像に対して本手法を適用して，それぞれの再現結果を確認する．

4.1. 実際に撮影した映像での実験

撮像面にほぼ平行な直線上を手動で DV カメラを移動させて映像を取得した。映像の撮影には市販されている SONY 製の DCR-PC120 を使用した。その主なスペックは表 4.1 の通りである。

表 4.1 使用したカメラの諸元

CCD	総画素数	1/4 型 155 万画素
	有効画素数	動画 97 万画素 / 静止画 139 万画素
レンズ (35mm) 換算		F1.8 ~ 2.2 f=4.2 ~ 42mm カメラモード時：48 ~ 480mm メモリーモード時：40 ~ 400mm

また、本手法を適用する映像として、本学付近の駐車場とで撮像面を本学に向けて撮影した映像を用いた。撮影した地点を図 4.1 に示す。図の矢印がカメラを移動させた場所である。ここで、各物体はカメラに近い順に、生垣と手前の木、生垣と建物間の木々、建物、遠くの木々、のように並んでいた。画像のサイズは 360×240 画素の 300 フレームであり、処理を行なう PC として CPU が Pentium 800MHz で MEMORY が 384MB のノートパソコンを用いた。



図 4.1 映像を撮影した地点

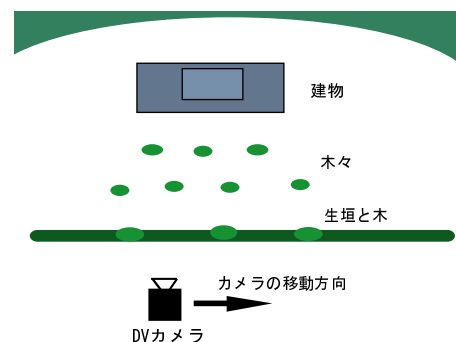


図 4.2 映像を撮影した地点 (俯瞰図)

レイヤー化の結果は図 4.3 から 4.6 のようになった。画像 a が最もカメラとの距離が近い領域であり、それ以降の画像はアルファベット順にカメラとの距離が離れた領域の画像となっている。これより、自然物体同士のおおまかな距離関係を保ったレイヤー化がなされているのが判る。

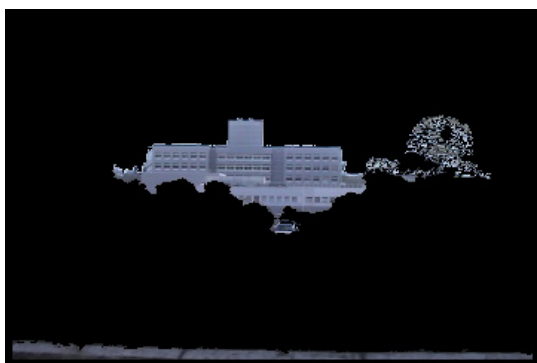
実際の自然風景とレイヤー画像を用いて自然景観を再現した結果との比較を図 4.7 から図 4.12 に示す。ここでは、実際の自然風景をそれぞれの図の上に、再現した結果を図の下に表示する。また、視点位置と視線方向を同時に変更した結果の画像を図 4.13 と図 4.14 に示す。提案手法を用いてレイヤー画像を合成し、OpenGL で作成した画像ビューアを用いて表示を行なった。



a



b



c



d

図 4.3 1 フレーム目のレイヤー化の結果

画像 a が最もカメラとの距離が近い領域で，アルファベット順にカメラとの距離が開いていき，画像 d が最もカメラとの距離が遠い領域となる



a



b



c



d



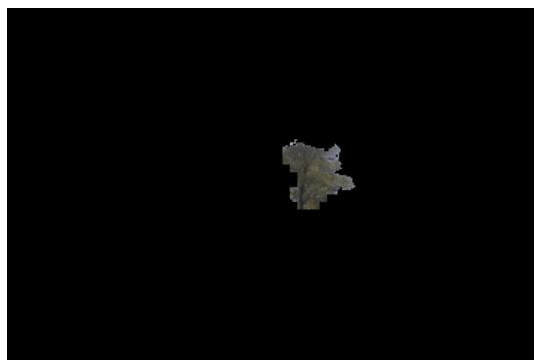
e

図 4.4 100 フレーム目のレイヤー化の結果

画像 a が最もカメラとの距離が近い領域で，アルファベット順にカメラとの距離が開いていき，画像 e が最もカメラとの距離が遠い領域となる



a



b



c



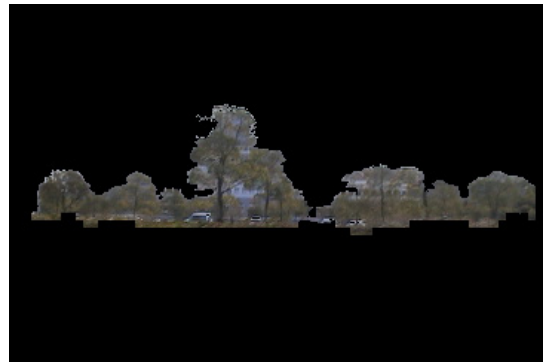
d

図 4.5 200 フレーム目のレイヤー化の結果

画像 a が最もカメラとの距離が近い領域で，アルファベット順にカメラとの距離が開いていき，画像 d が最もカメラとの距離が遠い領域となる



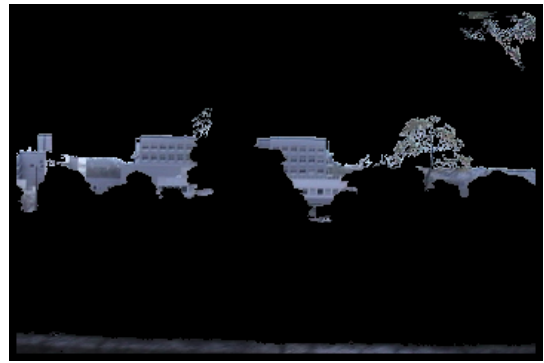
a



b



c



d



e

図 4.6 300 フレーム目のレイヤー化の結果

画像 a が最もカメラとの距離が近い領域で，アルファベット順にカメラとの距離が開いていき，画像 e が最もカメラとの距離が遠い領域となる



図 4.7 視線方向を左に動かした場合の画像
(上:実際の自然風景画像 下:提案手法を用いて再構成した画像)

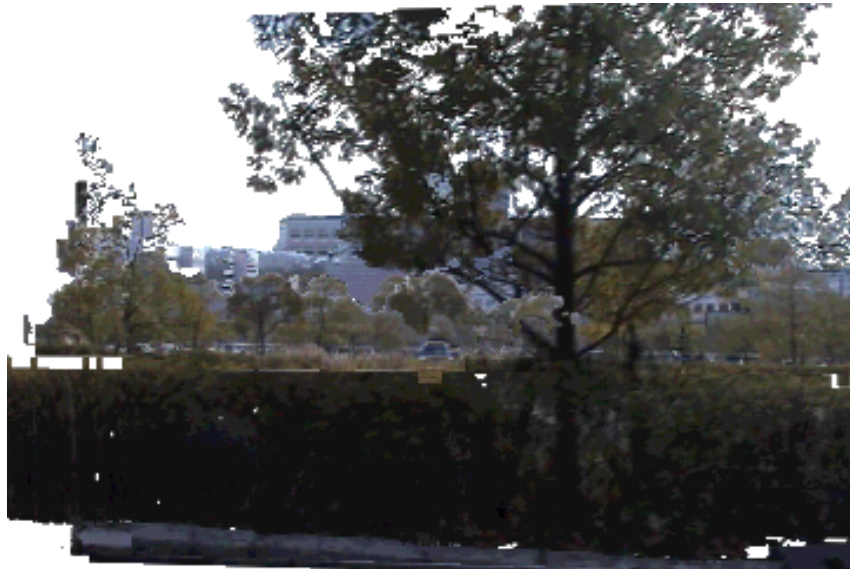


図 4.8 視線方向を左に動かした場合の画像
(上:実際の自然風景画像 下:提案手法を用いて再構成した画像)

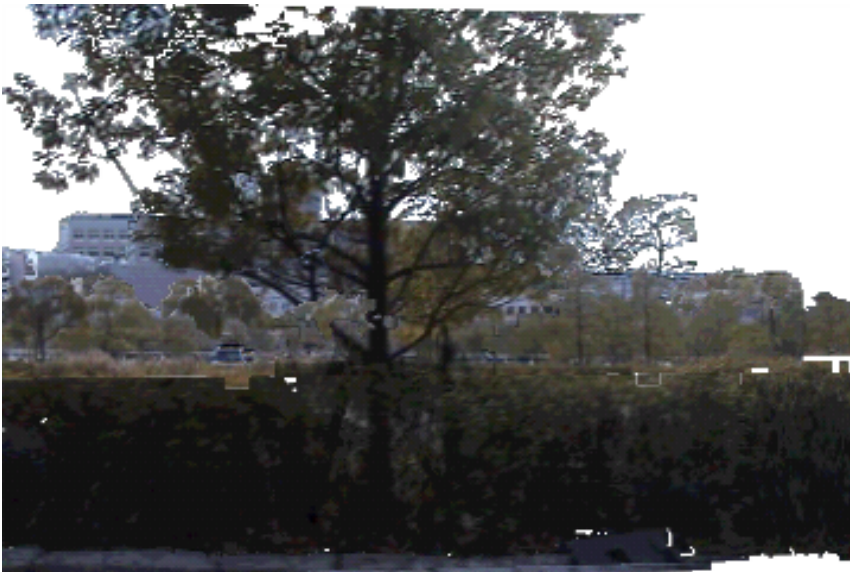


図 4.9 視線方向を右に動かした場合の画像
(上:実際の自然風景画像 下:提案手法を用いて再構成した画像)



図 4.10 視線方向を右に動かした場合の画像
(上:実際の自然風景画像 下:提案手法を用いて再構成した画像)



図 4.11 視点を左に，視線方向を右に動かした場合の画像
(上:実際の自然風景画像 下:提案手法を用いて再構成した画像)



図 4.12 視点を左に，視線方向を右に動かした場合の画像
(上:実際の自然風景画像 下:提案手法を用いて再構成した画像)



図 4.13 視点を前に，視線方向を左に動かした場合の画像



図 4.14 視点と視線方向をともに右に動かした場合の画像

4.2. 実験に対する考察

実験結果より，提案手法を用いて生成した画像は概ね実際の自然風景を表しているといえる．ゆえに，本手法は単眼ビデオカメラで撮影した自然風景映像から，物体同士の奥行きと視点位置や視線方向の変化を表現できる自然景観の再現を行なうのに有効な手法であるといえる．

しかし，提案手法での出力画像を見ると，カメラからの距離が近いレイヤー画像の一部で明らかに画像の欠落していると思われる領域がある．これは，カメラからの距離が近いレイヤーでは，視点を変更したときの表示に，各フレームでのレイヤー画像を合成した画像を用いているため，移動量分割の際のブロックマッチングのマッチングエラーや最適でない閾値設定などが原因となって，領域分割が失敗して出力画像に影響を及ぼしているからである．この問題を改善する方法として，移動量の急激な変化に対して，前回のマスクを再利用して画像の領域分割を行なうことが考えられる．

また，視線方向を大きく変化させた時の画像は実際の風景と比べてかなり異なっている．違いの生じる原因として，実際の場面では，視線の方向を少し動かしたときの視界の変化量は，視点から近い場所ではあまり変わらないが，視点からの距離に比例して大きくなり，視点からかなり遠い場所ではかなり大きくなる．例えば，視線方向を1度回転したときは，1m先の地点では約0.017m，1km先の地点では1000倍の約17mほど視界が横に動くことが分かる．一方，平行移動した場合の視界の変化量は，視点からの距離に関係なく一定となる．視線方向を変化した場合と平行移動した場合の視界の変化量を比べると，視点から遠くなればなるほど，変化量の差が大きくなる．このため，カメラを平行移動させて撮影した映像では，視線方向の大きな変化に対応する画像を取得することができない．

4.3. 本手法を様々な映像に適用した場合

次に本手法を評価するため、様々な映像に本手法を適用してその結果を確認した。本手法を適用した映像は、電車内より撮影した映像、車内より撮影した映像、手動で撮影した映像の3つである。レイヤー化に要した時間と各映像でのオプティカルフローを計算するフレーム間隔の初期値を表4.2に示す。ここで、映像を撮影するカメラと画像の処理に用いたPCは前述の実験と同じものを用い、処理を行なった映像も前述の実験と同じ360×240画素の300フレーム(10秒間)の映像を用いた。また、オプティカルフローを計算するフレーム間隔の初期値はカメラの移動速度に応じて設定した。各映像をレイヤー化した結果の画像を図4.15から4.17に、車内から若草山を撮影した映像を用いて映像空間を構築した結果の出力画像を図4.18に示す。

表 4.2 様々な映像のレイヤー化に要した処理時間

使用した映像	車窓風景 (電車内より撮影)	若草山 (車内より撮影)	平城京跡 (手動で撮影)
フレーム間隔	1フレーム	3フレーム	5フレーム
レイヤー化処理時間	71分12秒	40分38秒	40分10秒

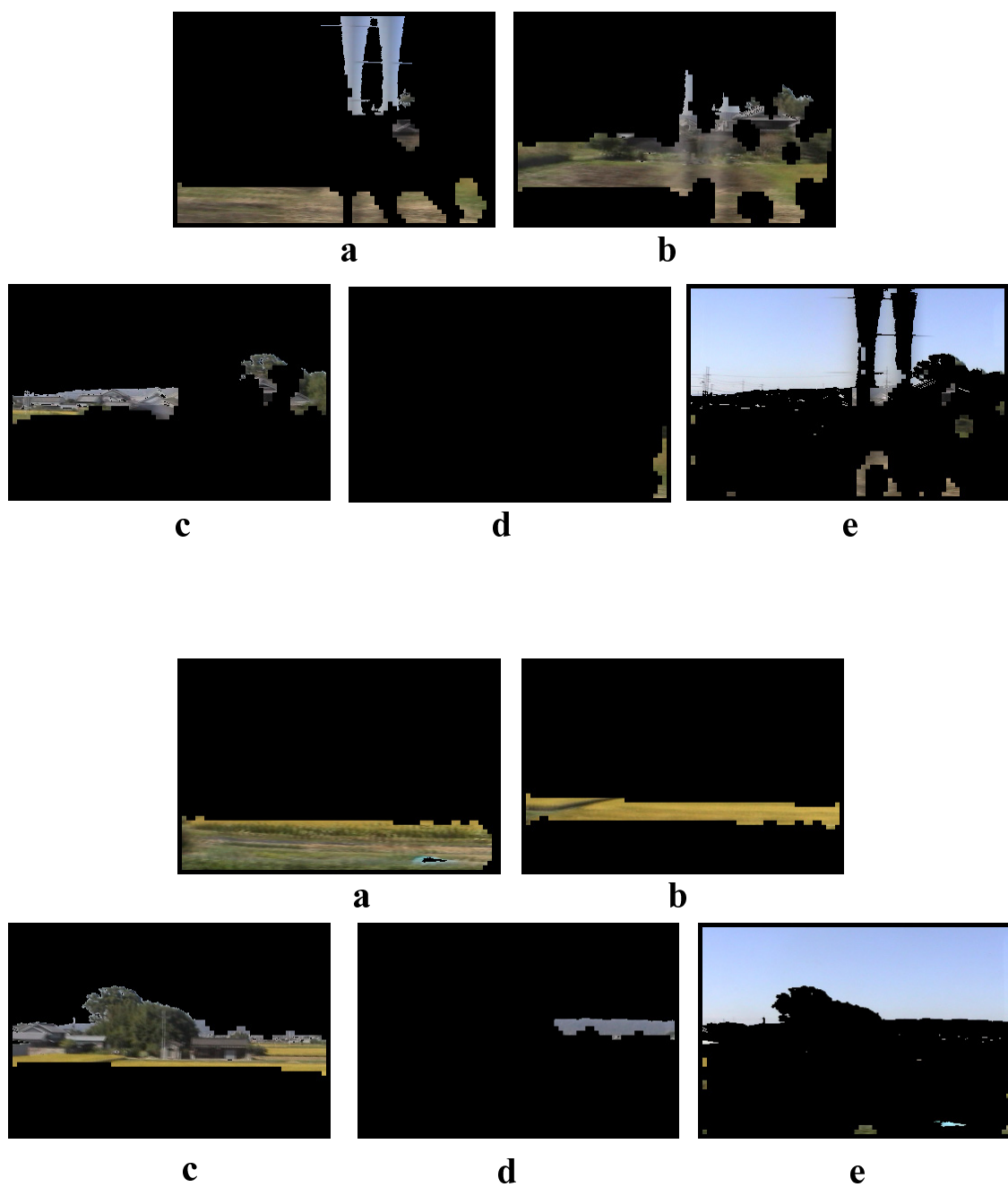


図 4.15 電車の車窓風景を撮影した映像のレイヤー化の結果
 画像 a が最もカメラとの距離が近い領域で，アルファベット順にカメラとの距離
 が開いていき，画像 e が最もカメラとの距離が遠い領域となる

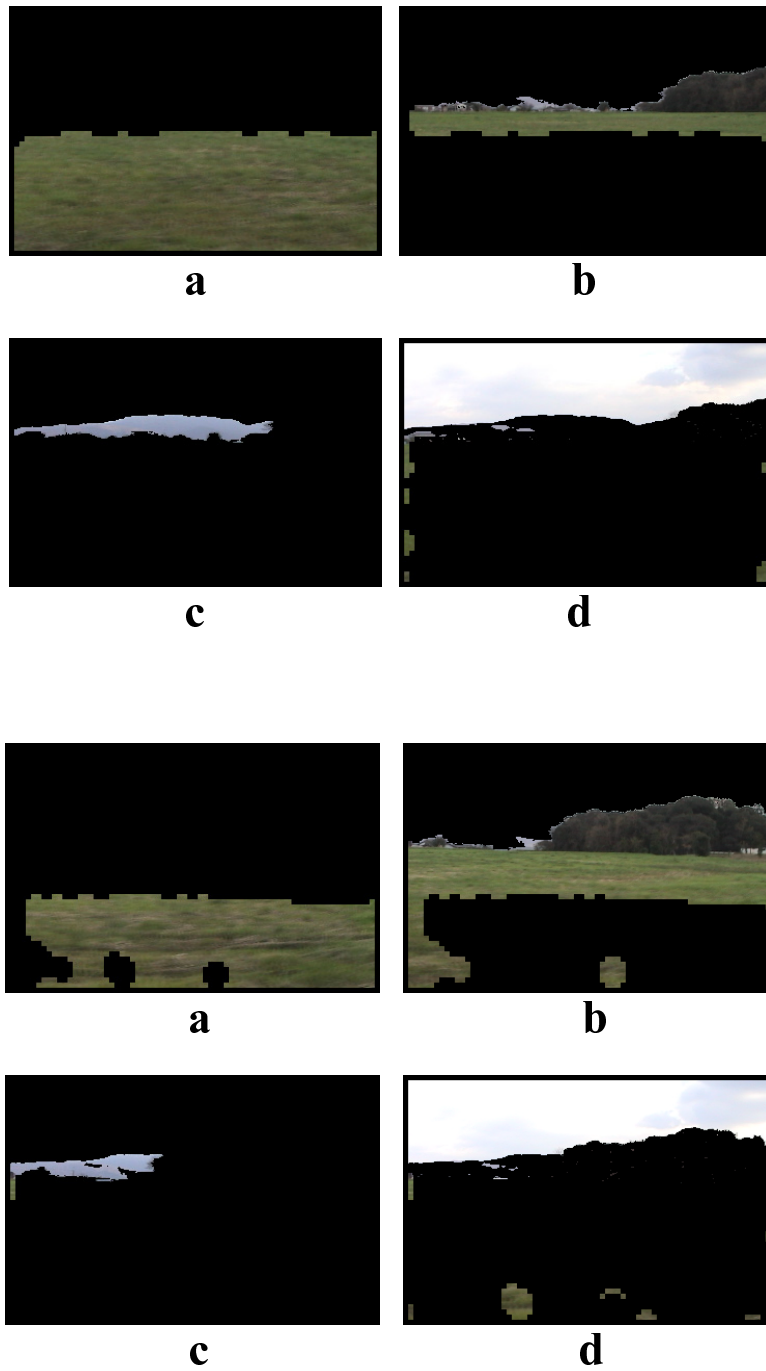


図 4.16 車の車窓から若草山を撮影した映像のレイヤー化の結果
 画像 a が最もカメラとの距離が近い領域で，アルファベット順にカメラとの距離
 が開いていき，画像 d が最もカメラとの距離が遠い領域となる

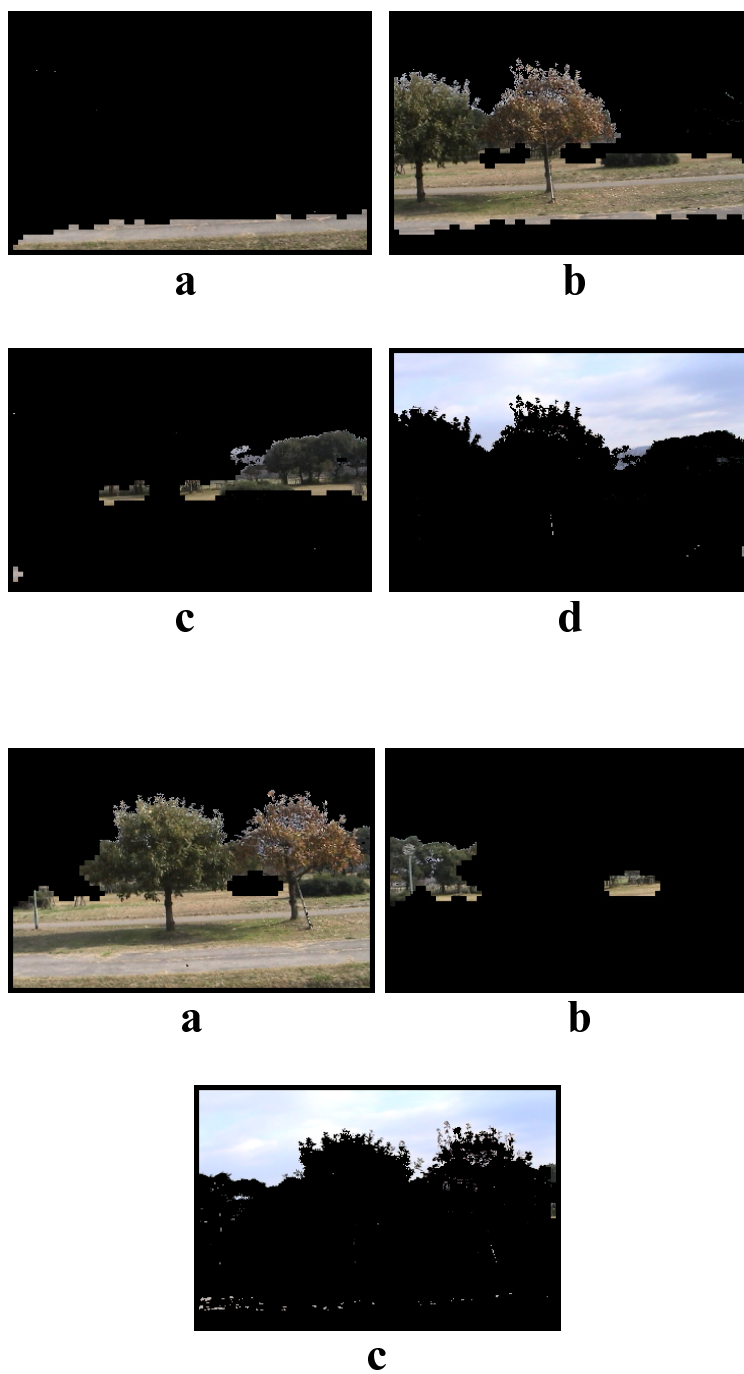


図 4.17 平城京跡で撮影した映像のレイヤー化の結果
 画像 a が最もカメラとの距離が近い領域で，アルファベット順にカメラとの距離
 が開いていき，画像 c または d が最もカメラとの距離が遠い領域となる



図 4.18 若草山を撮影した映像を用いて映像空間を構築したときの画像
上:実際に撮影した画像 下:提案手法を用いて景観を再構成した画像
(視点位置を前に,視線方向を右に変更)

4.4. 考察

表 4.2 より，電車の車窓から撮影した映像が他の映像よりも倍近くの時間が掛かっていることが分かる．この理由は，オプティカルフローを計算するフレーム間隔の初期設定値が，電車の車窓からの映像では1フレームずつであるため，他の映像と比べてオプティカルフローの計算回数が多くなるためである．しかし，フレーム間隔が5フレームずつである平城京跡で撮影した映像がフレーム間隔が3フレームずつである若草山を撮影した映像とほぼ同程度の時間が掛かっている．これは，移動量による領域分割処理の際の移動量の変動が大きかったために閾値の数が変動し，オプティカルフローの計算のやり直しが多かったことと，木々が多いために微小領域が増え，それらの統合処理に時間が掛かったことが主な原因であると思われる．

電車の車窓からの映像をレイヤー化した画像を見ると，図 4.15 の上部に表示しているあるフレームのレイヤー化結果である画像 a と b でブレて映っている物体が見える．これは，物体の移動速度が速いためにこのようにブレて撮影されたものである．ゆえに，移動速度が速い物体が画像内にあると，単一の物体が違う領域に分割されてしまって，そのフレームのレイヤー化の結果が悪くなることが，図 4.15 の下部に表示している別のフレームの結果と比較すると分かる．結果が悪くなる原因として，カメラの撮像スピードに限界があるために物体がブレて撮影されることがあることと，速すぎる物体に対してはブロックマッチングの処理が上手く行なえないということが挙げられる．本研究では，視点位置と視点方向の変化に応じて見た目のよい出力画像を提示することが出来ればよいと考えているので，移動速度が速い物体がある場合には，その物体を含む領域を無理にレイヤー化しようとせずに，景色の一部と見なしてレイヤー化を行なうことにより，見た目のよい出力画像を得ることを目指す．

第5章 結論

ビデオカメラで撮影した自然景観映像を用いて、被写体同士の奥行きの違いの表現と視点の移動や視線方向の移動による自然景観の変化の表現が可能な自然景観 CG を生成することができれば、撮影時のカメラの視点やその動きにとらわれずに、立体感や臨場感のある自然景観の鑑賞が可能になる。

そこで本研究では、単眼ビデオカメラを手動で平行移動させて撮影した自然景観の映像から、マーカや特徴点の情報を利用せずに映像上での各物体の移動量の違いと色相情報の違いを利用して、距離情報を保持したレイヤー構造を生成した。また、それらを利用して仮想空間内に実写に基づいた自然景観を立体的に提示することにより、被写体同士の奥行きの違いと視点変化による見え方の変化が表現できる自然風景 CG を再現するための手法を提案した。

本手法の有効性を確かめるため、実際に単眼ビデオカメラで撮影した映像に本手法を適用することによって、自然風景映像をレイヤー化して仮想空間を構築し、実際の自然風景と比較するという実験を行った。その後、各種自然風景映像に対して本手法を適用して評価を行なった。

これらの成果により、いままでは映像が撮影された状態を再生するだけの鑑賞しか出来なかったが、視点を対話的に動かして映像の空間を鑑賞することができる、という新しい鑑賞方法をもたらすと同時に、映像から得られる臨場感向上の可能性を示した。

謝辞

本研究の機会と共に，終始暖かい御指導，御鞭撻を賜りました情報科学研究科像情報処理学講座 千原 國宏教授に心から感謝致します．

副指導教官としてご助言頂いた視覚情報メディア講座 横矢 直和教授に厚く御礼申し上げます．

副指導教官として数々の有益なご助言を通じて筆者を指導していただきました情報科学研究科像情報処理学講座 眞鍋 佳嗣助教授に深く感謝致します．

日々の研究活動やミーティングにおいて常に御指導を賜わり，数々の有益なご助言を通じて筆者を導いていただきました情報科学研究科像情報処理学講座 安室 喜弘助手，井村 誠孝助手，村上 満佳子教務員に深く感謝の意を表します．

研究活動を通じ，本研究に対して御指導，御助言をしていただきました像情報処理学講座 未永 貴俊研究員，増田 泰研究員，佐々木 博史研究員に厚く御礼申し上げます．

研究活動やそれ以外の様々な面で日頃から多大な協力を頂いた像情報処理学講座博士後期および前期課程の皆様，いつもあたたかい心配りを頂いた 川本 桂子秘書に感謝致します．

最後に，これまで筆者を支えてくださった全ての皆様に感謝致します．

参考文献

- [1] R.C. Bolles, H.H. Baker, and D.H. Marimont. Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion. *International Journal of Computer Vision, No.1*, pp. 7–56, 1987.
- [2] E.S. Chen. QuickTime VR - An Image-Based Approach to Virtual Environment Navigation. *Proc. SIGGRAPH95*, pp. 29–38, 1995.
- [3] P. Debevec, C. Taylor, and J. Malik. Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A Hybrid Geometry and Image-Based Approach. *Proc. SIGGRAPH 96*, pp. 11–20, 1996.
- [4] O. Deussen, P. Hanrahan, B. Lintermann, R. Mëch, M. Pharr, and P. Prusinkiewicz. Realistic modeling and rendering of plant ecosystems. *Proc. SIGGRAPH 98*, pp. 275–286, 1998.
- [5] Yakup Genc and Jean Ponce. Image-Based Rendering Using Parameterized Image Varieties. *International Journal of Computer Vision, Vol.41, No.3*, pp. 143–170, 2001.
- [6] S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. Cohen. The Lumigraph. *Proc. SIGGRAPH96*, pp. 43–54, 1996.
- [7] B.K.P. Horn and B.G. Schunck. Determining optical flow. *Artificial Intelligence, Vol.17*, pp. 185–203.
- [8] Levoy, Marc, and Pat Hanrahan. Light Field Rendering. *Proc. SIGGRAPH96*, pp. 31–42, 1996.

- [9] Manuel M.Oliveira, Gary Bishop, and David McAllister. Relief Texture Mapping. *Proc. SIGGRAPH 00*, pp. 359–368, 2000.
- [10] P. Narayanan and T. Kanade. Constructing Virtual Worlds Using Dense Stereo. *Proc. ICCV98*, pp. 3–10, 1998.
- [11] Manuel M. Oliveira. Image-Based Modeling and Rendering Techniques: A Survey. *RITA, Vol.9, No.2*, pp. 37–66, 2002.
- [12] J. Shade, M. F. Cohen, and D. P. Mitchell. Tiling Layered Depth Images. *University of Washington, Department of Computer Science and Engineering Technical Report 02-12-07*.
- [13] J. Shade, S. Gortler, L. W. He, and R. Szeliski. Layered Depth Images. *Proc. SIGGRAPH 98*, pp. 231–242, 1998.
- [14] H-Y. Shum and L.-W. He. Rendering with Concentric Mosaics. *Proc. SIGGRAPH 99*, pp. 299–306, 1999.
- [15] Shuntaro Yamazaki, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, Katsushi Ikeuchi, and Masao Sakauchi. Light Field Rendering for Large-Scale Scenes. *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR 2001), Hawaii, USA*.
- [16] 安居院猛, 長尾智晴共著. C言語による画像処理入門. 昭晃堂, 2000.
- [17] 金山知俊, 原田省二郎, 増山繁. 分岐規則を再現し, 光, ホルモンの影響を考慮した樹木の生長モデル. 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol.J79-D-2, No.8, pp. 1362–1373, 1996.
- [18] 桑原教彰, 鉄谷信二, 志和新一, 岸野文郎. フラクタルを用いた階層的な樹木形状表現による 3次元樹木画像の高速生成方法. 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol.J78-D-2, No.7, pp. 1097–1104, 1995.
- [19] 徐剛. 写真から作る3次元CG イメージ・ベースド・モデリング&レンダリング . 近代科学社, 2001.

- [20] 坂口竜己, 大谷淳, 中津良平. 実写映像に基づいた三次元樹木モデルの生成. 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol.J82-D2, No.9, pp. 1469–1477, 1999.
- [21] 新谷幹夫, 杉山和弘. 解説:実写ベースのコンピュータグラフィクス技術. *IPSJ Magazine*, Vol.41, No.6, pp. 676–681, 2000.
- [22] 南田幸紀, 新谷幹夫, 納富幹人. EPI 解析におけるカメラ運動の制限緩和. 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol.J84-D2, No.11, pp. 2416–1477, 2001.
- [23] 保坂茂利, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 実画像に基づく風景のレイヤーモデル化手法. 第 47 回 システム制御情報学会研究発表講演会 講演論文集, Vol.47, pp. 307–308, 2003.
- [24] 保坂茂利, 井村誠孝, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 自然環境映像のレイヤー化に基づく仮想空間の構築手法. 映像情報メディア学会 2003 年冬季大会講演予稿集, p. 75, 2003.