

全方位画像を用いた広域環境の自由視点レンダリング

高橋 拓 二[†] 川崎 洋[†]
池内 克 史[†] 坂内 正 夫[†]

近年、映像技術や、コンピュータグラフィックス(CG)の発展にともない、現実感の高い仮想空間を生成することが可能となってきている。しかしながら、これまで主流であったモデルベースによるレンダリングでは、高性能なハードウェアを使用したとしても大規模で複雑な環境を構築するには限界のあることが認識されつつある。一方、大量の画像を蓄積し、これらの実画像を様々な加工・処理し、再構築することで撮影点以外での視点映像を作り出すイメージベースと呼ばれる手法が注目されている。この手法を用いればジオメトリベースでは困難であったCG画像を再現できる可能性がある。これまで、イメージベースの研究対象としては、比較的小さい対象が主であった。また、広域を対象とした研究であっても広範囲に自由視点の画像再構築を実現した例はない。そこで本論文では、イメージベースによる手法を用いて、より自由に、広範囲にわたり、都市空間という広域環境をリアリティを持ってレンダリングする手法を提案する。本手法は、直線経路に沿って撮影した映像を素材とし、光線空間に基づく画像の再構成手法により、撮影経路と同一平面に限定される任意視点からの画像生成を可能とする。また、本手法の有効性を示すために、実際に車載カメラで撮影した都市の映像を用いて実験を行ったところ、良好な結果を得ることができた。

Arbitrary View Rendering System Using Omni Directional Image

TAKUJI TAKAHASHI,[†] HIROSHI KAWASAKI,[†] KATSUSHI IKEUCHI[†]
and MASAO SAKAUCHI[†]

This paper presents a new method for rendering views, especially those of large-scale scenes, such as broad city landscapes. The main contribution of our method is that we are able to easily render any view from an arbitrary point to an arbitrary direction on the ground in a virtual environment. Our method belongs to the family of work that employs plenoptic functions; however, unlike other works of this type, this particular method allows us to render a novel view from almost any point on the plane, at which images are taken. To achieve this purpose, we use omni-directional camera and multiple cameras for capturing process and apply IBR for rendering process. In this paper, we describe the basic theory of a new plenoptic function, analyze the applicable areas of the theory and the characteristics of generated images, and demonstrate a complete working system using omni directional images.

1. はじめに

近年、映像技術の発展にともなって、高品質な映像を一般的に見ることができるようになってきた。このため、仮想空間を構築する際に要求される映像の質や技術は非常に高いものとなってきている。コンピュータグラフィックス(CG)は、現実感の高い仮想空間を視覚的に生成するための一般的な手法であり、従来から幅広い分野で研究がなされてきたが、近年では、バーチャルリアリティやGIS, ITSなどにおける技術のベースとしてもさかんに研究が行われている。

最近のCGでは、計算機の能力向上やアルゴリズムの進歩により、大規模かつ精密な三次元幾何形状モデルを扱うことで、相当にリアリティの高い精細な映像の生成も可能となっている。しかしながら、このようなモデルベースによるレンダリングでは、高性能なハードウェアを使用したとしても限界のあることが認識されてきている。一例をあげると、動物の毛皮などのように精細な形状は、単純なジオメトリベースによる手法では再現が難しい。

一方、大量の画像を蓄積し、これらの実写画像を様々な加工・処理し、再構築することで撮影点以外の視点での映像を作り出すイメージベースと呼ばれる手法が注目されている。この手法を用いればジオメトリベースでは解決できなかった画像を再現できる可能性

[†] 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

がある。

以上のようなコンピュータグラフィックス(CG)の研究に関する流れの中で、近年、都市のような大規模な仮想空間を構築しようという試みが多くなされている。しかし、これまでの研究のほとんどは、地図などのモデルを用いたジオメトリベースによるものであり、再現される仮想空間は現実感の乏しいものであった。最近では、これに実テクスチャを貼るなどして、よりリアリティを高める研究も行われているが、十分に現実感のあるレベルには達していない。

これに対して、イメージベースを用いた仮想空間の構築が古くから行われている。たとえば、パノラマ画像などは視点位置が限定されるが、イメージベースの仮想空間構築の一例といえる。イメージベースであるため、ジオメトリベースでは再現できないような特殊な光源効果や幾何形状を再現することができる。

本論文では、このイメージベースによる仮想環境構築をさらに進めて、光線空間という概念を用いることで、より自由に、広範囲にわたり、都市空間という広域環境をリアリティを持ってレンダリングすることを試みる。

2. 関連研究

本章では、現実感の高い仮想空間を視覚的に生成するための一般的な手法であるCG技術に関して、従来からあるモデル・ベースト・レンダリングと最近注目を浴びているイメージ・ベースト・レンダリング(IBR)の2つを紹介をする。さらに本論文の基礎概念となっているIBRの最近の動向について述べ、最後に、特に広域空間を生成することに関する研究事例について触れる。

2.1 モデル・ベースト・レンダリング

CGのモデルベースによる仮想空間の生成においては、その生成段階を大きくモデリング段階とレンダリング段階の2つにわけて考えることができる。前者のモデリング段階では多くの場合、人手によって仮想空間内に存在する物体の3次元形状と、反射特性など材質の光学特性が与えられる。ここでは物体の3次元形状としては表面を表現するメッシュモデルが用いられることが多い。また物体表面の反射特性としては、反射モデル関数を仮定しそのパラメータを各メッシュモデルごとに定義するのが一般的である。

しかし仮想空間の現実性を追求していくにつれ、従来型の3次元CGの問題点が広く認識されるようになってきた。これは、大きく2つの側面からとらえることができる。1つ目は、いかにして実際の物体の表

面形状とその反射パラメータを取得するかということであり、もう1つは都市などのような大規模なモデルを現実的に構築し描画することの困難さである。

これら問題点に対してKawasakiらは、実験車に全方位カメラを搭載し、EPI手法を用いることで、大規模都市モデルの自動構築および画像情報の取得を同時に実現する手法を提案している¹⁰⁾。

2.2 イメージ・ベースト・レンダリング

前節で述べた、従来型の3次元CGにより仮想空間を描画する際の問題点を克服する手法として、イメージベースト・レンダリング(IBR)と呼ばれるアプローチが注目されている。すなわち、モデルを推定せずに、物体やシーンの見え方そのものを入力画像として記録しておき、これらを再合成することで新しい画像を生成するという手法である。この手法では対象物体の形状や反射特性を考慮する必要がないため、先に指摘したモデル化の困難な物体に対しても適用することができる。

IBRの研究例を以下に紹介する。

- (1) Plenoptic Function¹⁾... 空間中に存在する光線は7次元ですべて表現することができる¹⁾。すなわち、視点の座標 (x, y, z) 、光線の向き (θ_x, θ_y) 、波長 λ および時間 t である。この7次元のデータを用いることで空間中のすべての光線を記述することが可能であるとした。
- (2) 光線空間法¹²⁾... 実際に、空間を光線で記述することで任意視点の画像を効率的に再構築する手法として提案された。空間を伝搬する光線は減衰・変移しないものとするので、7次元の光線情報を4次元に減らし、取得する画像を大幅に減らした点が特徴である。ここでいう4次元とは先ほどの7次元から z 座標、波長 λ および時間 t を差し引いたものである。画像を再構築する際には逆に光線を任意平面上にプロットすればよい。
- (3) Lumigraph⁵⁾... 先に述べた光線空間法が平面 (x, y) および光線の向き (θ_x, θ_y) で4次元空間を表現したのに対して、この論文においては、この4次元を、2つの平行した平面を横切る座標 (u, v) および (s, t) で表現することで、効率的なレンダリングを可能にした。ここでは、このような4次元空間を Lumigraph と呼んでいる。この論文では、データ圧縮のために物体の3次元形状情報を利用している点が注目される。
- (4) Light Field Rendering¹¹⁾... この研究においても光線を Lumigraph 同様 (u, v) 、 (s, t) 平面を

用いた4次元で光線空間を表現している。この論文では「近い所を通る光線は連続的に変化するため相関が高い」という特徴を利用して光線空間の圧縮を試みている。

2.3 イメージ・ベース・レンダリングの現在

このようにIBRにおいてはモデルを利用しないため、形状や表面特性が複雑でMBRではモデル化が困難な物体の場合でも、光線を十分密に記録することで再現することが可能である。しかし一方で、データ量は、MBRが物体の形状と反射パラメータなどに限定されるのに対して、IBRでは前述のように光線空間内の光線の分布をすべて記録するために非常に大きい。そこで、最近では、3次元形状をIBRに利用することで、画像データを大幅に削減する研究が試みられている。

論文8)では、イメージベースとモデルベースとの関係はデータの大きさと表現する画像品質とトレードオフの関係にあるとした分析を行っている。また、論文3)では、シミュレーションによる定量的な分析により、画像品質を落とさない最低必要なサンプリング枚数の推定が試みられている。このように、現在のイメージベースの研究はデータの圧縮と密接にかかわって進められている。

2.4 都市などの広域空間を対象とした研究

このようなイメージベースの研究に関する流れの中で、近年、都市のような大規模な仮想空間を構築しようという試みがなされてきている。これは、1つにはジオメトリベースによる限界から、必然的にイメージベースによる試みが多く行われるようになってきたためとも考えられる。広瀬らは車載型撮影システムにより、実際に都市空間を撮影した画像を元に仮想空間の生成を試みている⁷⁾。この手法はイメージベースの考えに基づいているが、画像生成に関しては光線空間などの複雑な手法は用いず、すべての経路における全周画像データをディスクに保存しておくことで、レンダリングの際には必要な画像を選択し視線方向の部分を再提示するというものである。加藤らも、映像の取得に全方位カメラを用いて同様のシステムを構築している⁹⁾が、広瀬らと同様に光線の再構築などは行っていない。また、Antoneらも、パノラマ画像にジオメトリを加えたユニークな街のモデリングを行っているが、光線空間を積極的に利用したものではない²⁾。これに対してTakahashiらは、スリットを用いることでより自然な画像合成を実現するIBRシステムを提案している^{14),15)}。また、同時期、山口らもほぼ同じ手法による画像生成手法を提案している⁴⁾が、Takahashi

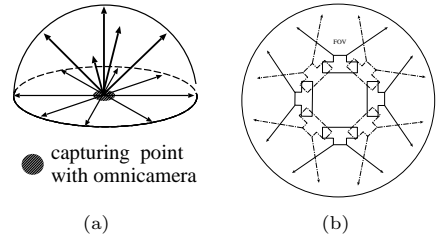


図1 (a) オムニカメラで撮影した画像の持つ光線 (b) 円筒状に配置されたカメラで全方位画像を撮影
Fig. 1 (a) Capturing with an omni-directional camera, (b) Configuration of cameras to obtain cylindrical images.

らが任意視点からの単一画像を生成しようとしているのに対し、山口らは経路から眼間距離だけ離れた対の画像を生成することで両眼ステレオ視を実現しようとしている点などが異なっている。

また、これら手法は、スリットを用いている点など、論文13)と類似した部分もあるが、撮影経路が直線であることや広域環境を対象としているなどの違いがある。

3. 任意視点からの画像合成

ここでは、都市をはじめとする広域仮想空間において、任意地点から、任意方向への画像を生成する手法について述べる。また、新しい視界が作成できる範囲などについても述べる。

3.1 全方位画像の取得

3.1.1 全方位画像カメラ

本システムは、IBRの概念に基づいているため、光線空間内の光線分布の記録方法は重要である。本研究では入力画像として全方位画像を用いる。このため、撮影した各地点において水平方向の360°全方位の光線を記録することが可能である。

このような全方位画像を最も簡単に撮影する手段として全方位カメラの利用が考えられる。この全方位カメラで撮影した画像からは水平方向だけではなく、上半球すべての方向の透視変換画像を容易に作ることができ、メリットは大きい(図1(a))。しかしながら、反面、解像度を犠牲にすることになる。

全方位画像を撮影するもう1つの具体的な方法として、図1(b)のようにいくつかのカメラを、それらすべてのカメラの光軸が1点で交わるように円筒状に並べる方法があげられる。各々で撮影した画像を円筒座標系に投影することで、全方位画像を簡単に生成することができる。本研究では、画像の再現が目的であるため、解像度の高い後者の方式による全方位画像を利

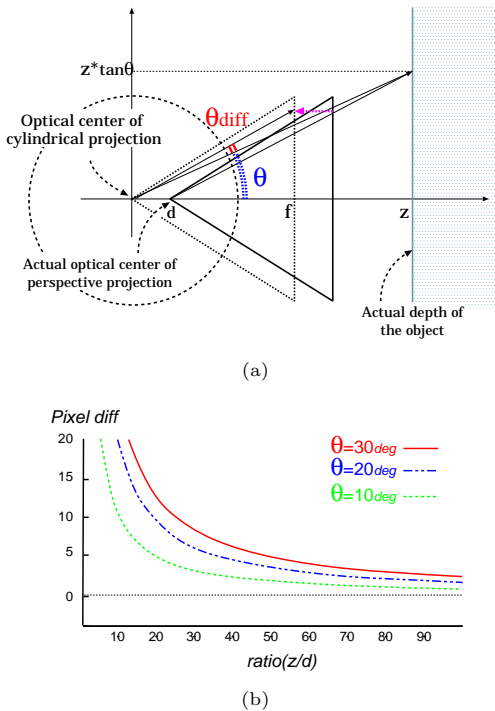


図2 (a) 光学中心が一致していると仮定して透視変換画像を円筒座標系に投影 (b) ピクセル誤差
 Fig. 2 (a) Projection of perspective image to cylindrical coordinate, (b) Calculation of pixel diff.

用する。

3.1.2 全方位画像画像の歪み

撮影したそれぞれの透視変換画像を円筒座標系に投影する際、図2(a)のように、円筒座標系とカメラの光学中心との間は位置が離れているため、光学中心が一致していると仮定した計算では、

$$\theta_{diff} = \arctan \left(\frac{z}{z-d} \tan \theta \right) \quad (1)$$

の誤差が生じる。実際の実験において、画角 65° のビデオカメラを使用し、これを幅 640 ピクセルの画像として取り込み円筒座標に変換することを考慮し、式(1)で計算される誤差をピクセル換算しプロットしたものが、図2(b)である。カメラと円筒座標系の光学中心の距離 d に対して、円筒座標系の光学中心と建物との距離 z は通常十分に離れているため、誤差は数ピクセル以内に収まることが分かる。しかし、電柱や看板のようにカメラとの距離が近い物体に対してはこの誤差が拡大するため、画像の継ぎ目に物体が2重に描かれるなどの影響が出る。物体の3次元位置を利用するなどして、これら歪みを補正することも可能ではあるが、本研究においてはイメージベースによる画像合成が主目的であることから、全方位画像の補正は



図3 実世界での画像撮影用の車
 Fig. 3 Data sensing and acquisition car.

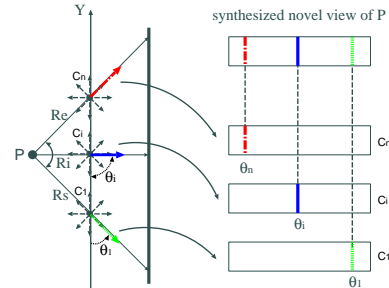


図4 画像の再構築方法
 Fig. 4 Reconstructing a novel view.

今後の課題とする。

3.1.3 実装システム

本システムは、都市空間に代表される広域都市空間の構築を目的としているため、実際に都市空間の画像を撮影する必要がある。本システムにおける実際の画像取得には、図3のような車載型撮影システムを使用する。この車には以下のような機能が搭載されている。

- 全方位カメラ
- 全方位画像を生成するための複数カメラ
- differential GPS
- ジャイロセンサ
- 車速センサ

以上のような機能を搭載している車載型撮影システムを用いて、都市空間において全方位画像を撮影する。また光線空間法に従って各光線を正確に記述する必要があるため、車載されている D-GPS などを使って各全方位画像の撮影した地点を画像とともに記録しておく。また、今回は分析や実装を分かりやすくするために、直線経路のみを選択し撮影した。

3.2 仮想視点からの視界合成

3.2.1 画像の合成方法

図4のように、 Y 軸上を車で走りながら全方位画像を撮影し、点 P からの視界(画角は $R_s \sim R_e$)を作ることを考える。光線空間の考え方によれば、点 P まわりの R_s から R_e までの光線を用いて実現できる。

ここで図の R_i について考える． Y 軸上の任意の点で全方位画像を撮影しているので点 C_i においても全方位画像が撮影されており，その全方位画像には点 C_i まわりの全方向の光線が含まれていると考えられる．すなわち点 C_i における全方位画像には図の R_i なる光線が含まれていると考えられるので，この光線に関しては図 4 右側にあるように，点 C_i で撮影した全方位画像から R_i に相当するスリットを切り出すことになる．このように撮影した全方位画像列から，各光線に対応するスリットを切り出し，それらを並べ合わせることで，点 P からの視界を作成することができる．

3.3 視点合成が可能な領域

3.3.1 2次元上の合成可能領域

ここでは2次元上，すなわち地平面上において，どの程度の範囲内で新しい視界を生成することができるかの検討を行う．図 5 において， xy 平面を水平面と考え，またその xy 平面上においてカメラが点 C_0 から C_n までの間を全方位画像を撮影しながら直線上を移動するものとする．再構築できる視線の方向は場所により異なるが，図の斜線部に示される，視角 FOV を円周角とする 2 つの扇型の内部となる^{14),15)}．現実には，すべての視線方向の再構築ができなければ，システムとして不十分であるため，自由に移動可能な範囲は，理論的な計算により誤差が許容される経路近くのものに限定される．しかし，本研究の目的が都市における広域仮想空間の生成であり，画像の取得は道路上を走行することでを行い，新しく生成する画像は，主に道路の幅の内側からの視点のみであることを考えると，この範囲でも十分に目的を満たすことができる．

3.3.2 進行方向の光線

上述の視界範囲の分析において問題となるのが，「singular direction」を含む視線方向，すなわち，画像を撮影した走行路に平行な光線を含んでいる場合である．

図 6 (b) に示すように，必要な光線がすべて撮影した全方位画像に含まれている場合には，画像生成時には，これらの光線を切り出し再構成するだけでよい．これに対して，singular direction を含む場合（図 6 (a)）には，スリットを切り出してくる全方位画像について，点 A から前方の全方位画像列と点 B から後方の全方位画像列の 2 つの画像列から切り出してくることになる．つまりこの図 6 (a) では，生成する画像の右側は点 A より前方で撮影された全方位画像からのスリットで構成され，左側の画像は点 B より後方で撮影された全方位画像からのスリットで構成される．この部分の不連続性により，生成される画像において，

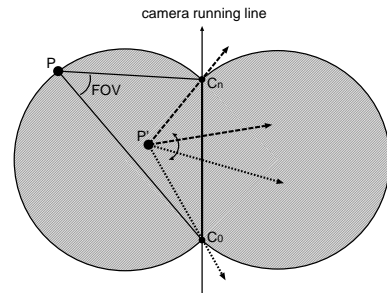


図 5 2次元上の合成可能範囲

Fig. 5 Reconstructable area on the ground.

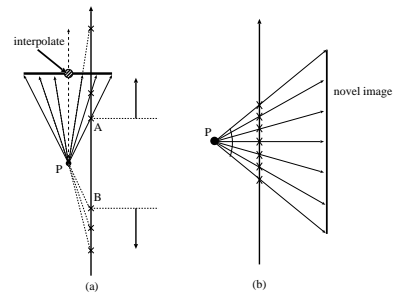


図 6 (a) singular direction を含む場合の画像生成
(b) singular direction を含まない場合の画像生成

Fig. 6 (a) With a singular direction, (b) Without a singular direction.

singular direction を横切る部分では合成画像に違和感が生じる可能性がある．

また，singular direction に平行な光線は存在しないので，画像を生成する際にはこの光線を補完しなくてはならない．本論文では，その光線に最も近い光線によって代替することを行っている．図 7 にこのような手法により補間して生成した singular direction を含む画像例を示す．進行方向付近では幾何学的な歪みが，境界部分においてはカラーの不連続などが観察される．この幾何学的な歪みは，画像の取得を車載カメラで行っているため，離れた地点でサンプリングした画像を同じ画像内で多数使用する進行方向において，車の微小な揺れなどが蓄積されるため生じる．しかし，singular direction には大きな視差がないため，このような補間による歪みが生じてても，合成画像に大きな違和感は生じない．

4. 生成された画像における問題点の検討

光線空間を記述するためのデータが十分であれば，蓄えられているデータから該当する光線を選択するだけのため画像上に歪みは発生しない．しかし実際には Plenoptic function にある 7 次元光線をすべて記録しておくことは不可能であり，実際に画像を生成する場

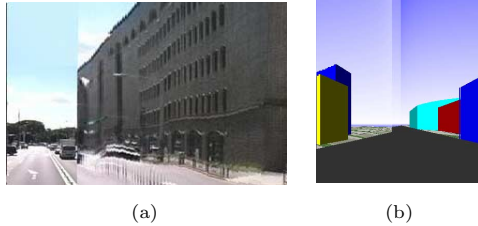


図7 singular direction を含む画像. (a) 実画像, (b) シミュレーション画像

Fig. 7 Sample image of singular direction. (a) Real image, (b) Simulated image.

合は4次元, 3次元と次元を落とすことでレンダリングを可能にしている. このようにIBRによる仮想空間の生成は, 次元を落とすことによる歪み, すなわち光線データの欠落による歪みが生じる. 特に, ジオメトリ情報をまったく使わずに仮想空間を生成した場合は, 画像中の歪みが顕著となることがある.

4.1 横方向のひずみ

再構築画像をレンダリングする際に, 幅1 pixelの縦のラインをそれぞれ1枚のサンプリング画像から切り出すことができれば横方向の歪みは存在しない. しかし, 現実のシーンにおいて, 特に広域環境においてこれを実現することは困難である. このため, 実際のオブジェクトの位置関係によってはダブルイメージやゴーストと呼ばれるIBR特有の歪みが生じることになる. これらの歪みを, ジオメトリ情報を付加することで, 回避する研究が行われている⁶⁾. 本論文では, 都市の最構築が目的であり, 次節で詳しく述べるが, 都市においては横方向のカメラと対象物体との距離に差があまりなく, また, ビデオレートが十分に高いため, 現実には, 横方向の歪みはほとんど発生しない.

4.2 縦方向のひずみ

また, 同様に光線がないことによる縦方向の歪みも指摘されている^{4),13),15)}. ここでは, オブジェクトの位置や幾何形状が分かれば, 歪みを除去することが可能である. 図8において, 直線Y上を全方位画像を取得しながら走行し, 点Pからの視界を生成することを考える. この図において, 点Pから点A₀の方向の光線は全方位画像中の光線A₀Aで代用される. 同様に点Pから点B₀の方向の光線は全方位画像中の光線B₀Bで代用される. もし, 建物の位置や形状の情報が既知ならば, 新しい視点からの光線PAを全方位画像中の光線A₀Aで代用する際に, 縦方向に正しく伸縮させることができれば縦方向の歪みの除去が可能である. 以下では, 本研究において実際に歪みを除去する方法について述べる.

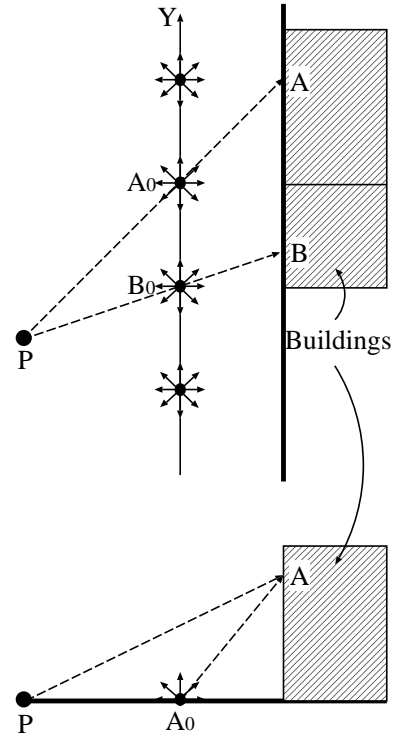


図8 縦方向のひずみの補正
Fig. 8 Remove vertical distortion.

4.3 都市モデルを用いた歪みの除去

一般的にビルなどの建造物は直方体をしていることが多い. これは特に都市において, 主要道路に面している大型の建造物などに関して, よくあてはまる. 加えて, そのようなある程度幅の広い道路に面しているビルは, 多くの場合その道路に面している壁が, 隣のビルと並んでいることが多い. そこで, このようなビル群に関しては以下のような特徴を仮定できる.

- (1) 建造物の多くは直方体に近い形であり, 道路に面している面は平面に近い形状をしていることが多い.
- (2) 特に幹線道路などの広い道路に面して建てる建造物は, その道路に面している面に関して, 隣接する建造物のそれと同じ平面上にあることが多い.

都市の建造物の多くに見られる, これらの特徴を用いて, イメージ・ベスト・レンダリングによる歪みの除去を試みる. そのために以下のような都市のモデルを設定する.

設定 道路に面している多くの建築物に対して, それらの道路に面している平面は, 1つの平面に乗っていると近似することができる.

4.3.1 カメラ・建物間の距離の推定

上記の設定は、都市の形状を1つのパラメータ(カメラ・建物間の距離)で表現したものである。そこで、全方位画像を撮影した地点から、ビルなどの建築物の道路に面している面までの距離を求める。本研究ではGPSなどのセンサにより、撮影位置がある程度分かっているため、映像中の特徴点をトラッキングするだけで建物の奥行きが推定が可能である。今回は都市に特化したEPI手法¹⁰⁾を用いてこの奥行き距離の推定を行った。EPI(Epipolar Plane Image)とは、進行方向に対して垂直横向きに設置したカメラを、直進運動させながら映像を撮影し、この映像を時間軸方向に積層し、エピポーラ面と平行な平面で切断して得られる画像のことである。EPI上では、奥行き情報が傾きとして現れるため、この傾きを調べることで物体の奥行きを推定することができる。特に都市を撮影した映像は、建物境界などにおいて強いエッジが出るため、これをEPI上にプロットし利用することで安定した奥行き検出が可能である。また、通常EPI法ではカメラの速度が一定であることが条件となっているが、実際の車速は一定ではないため、これを補正するためにGPSと速度センサのデータを用いている(論文10)では、建物の微妙な凹凸を検出するためにさらに複雑な処理も行われているが、今回はこれらばらつきのある奥行きを1つの代表値で表すため、処理は簡単である。実際の処理では、EPI法で得られる奥行き情報のうち、最も頻度の高かったものを代表値とした。

4.3.2 ひずみの補正方法

図9の「panoramic image capturing line」を全方位画像を撮影する走行路とする。ここでは全方位画像として円筒座標系に投影された全方位画像を考える。この条件のもとで点Pから見た視界を合成することを考える。このとき生成される画像中に全方位画像 I_n から斜線部のスリットが含まれているとする。ここではこのスリットをどのように補正するかについて具体的に説明する。

まず点 I_n から撮影した画像を点Pからの視界として用いるのでその距離に応じた補正を行う必要がある。すなわち合成される画像の横方向の各ピクセル列に対して、縦方向に次のような補正を行う。

$$prop1 = I_n E / PE \quad (2)$$

その後、このままでは生成された画像は円筒座標系に投影された画像になっているため、これを通常の透視変換画像にするために、次のような補正を縦方向に行う。

$$prop2 = 1 / \cos \alpha \quad (3)$$

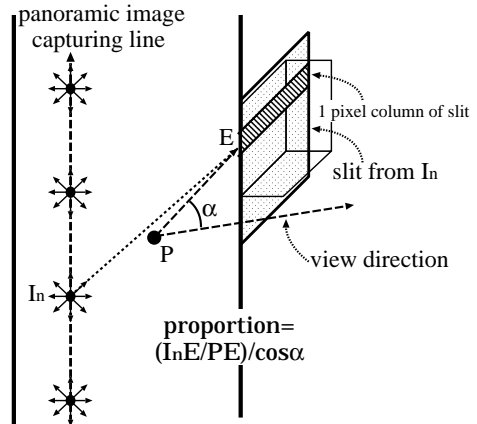


図9 3次元情報による補正方法

Fig.9 Correct the distortion using 3D information.

ただし生成される画像と、撮影された円筒座標系に投影された全方位画像の焦点距離は等しいとする。また、 α は、視線方向とPEとのなす角である。

以上の2つの補正を行い、縦方向のひずみ補正を行う。すなわち生成される画像の横方向の各ピクセルに対して、対応する全方位から切り出してきたスリットと推定したカメラ・建物間の距離を用いて、以下のような補正を縦方向に行うことで、縦方向のひずみを軽減する。

$$\begin{aligned} prop &= prop1 \times prop2 \\ &= \frac{I_n E / PE}{\cos \alpha} \end{aligned} \quad (4)$$

5. 実験

4.3.1項で述べた方法によりカメラ・建物間の距離を求め、この距離情報を、4.3.2項で述べた補正手法に用いることで、イメージベースによる自由視点からの画像生成を行う。実験には、シミュレーション画像と実際に都市を撮影した実画像の両方を用いた。

5.1 シミュレーション画像

シミュレーション画像を用いて実験を行った。図10のように、計算機により作成したポリゴンに、デジタルカメラで撮影した建物テクスチャ画像をマッピングしてシミュレーション用の画像を作成した。このようなパノラマ画像の連続画像列を生成し実験を行った。

最初に3次元情報による補正を行う前の画像を図11に示す。図から明かなように、スリットのつなぎあわせの部分において不連続が見られる。これに対して、図12上図は、図11と同じ位置に仮想カメラをおき、縦方向のひずみを修正したものであり、図12下図は、図11より離れた地点に仮想カメラを設定し、縦方向

のひずみを修正し生成した画像である．図 12 上下両図から，縦方向の歪み補正により，スリットのつながり目の不連続が大幅に軽減されていることが分かる．

5.2 実画像

次に実画像において実験を行った結果を示す．全方位画像は 3.1.1 項の図 1 (b) のように車載型撮影システムの車の屋根の上にカメラを配置するシステムで作成した．すなわち，カメラの光軸ができるだけ 1 点で交わるように配置したカメラで撮影した透視変換画像を，円筒座標系に投影することで全方位画像を生成した．この際使用したカメラは SONY 社製の DXC-9000 であり，レンズは富士写真光機社製の S12 × 5BRM-38 を使用した．スペックは，水平画角が $65^{\circ}14'$ ，垂直画角が $51^{\circ}17'$ ，対角画角が $77^{\circ}19'$ である．また Trimble 社の 7400 型 GPS を用いて画像を撮影した地点を記録した．使用した GPS の精度は $\pm 3\text{cm}$ (カタログ値) である．以上のようなシステムを用いて秒間 30 フレームで撮影しそれらを用いて全方位画像を生成した．具体的には JR 信濃町駅付近から JR 四谷駅付近までの外苑東通りを走行し，図 13 のような全方位画像



図 10 実験に用いた，シミュレーションパノラマ画像
Fig. 10 Simulated panoramic image.

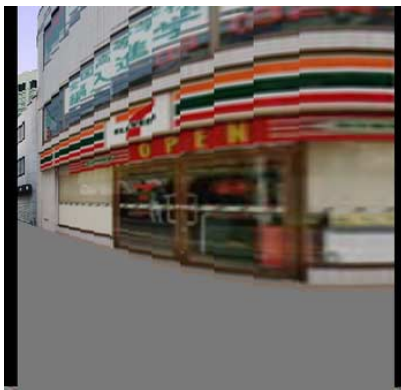


図 11 3次元情報による補正前
Fig. 11 Before correction.

像を生成した．

図 14 は 3.2 節で述べた手法で生成した画像である．すなわち 3 次元情報をまったく用いないで作成した画像であり，建物の境界や窓のエッジ，また歩道と道路の境目において不連続が認められる．これに対してカメラ・建物間の距離を用いて補正を行った画像が図 15 である．この図においては図 14 で認められたひずみが大幅に軽減されて，建物や窓のエッジ，また歩道と道路の境目がきれいにつながっていることが分かる．これらの図を比較すると，3 次元情報による補正が，縦方向のひずみに対して大きな効果のあることが分かる．また，図 16 は，建物からの距離が異な



図 12 3次元情報による補正後．上図は撮影点よりも前にカメラを設置 (図 11 と同じ位置)．下図は撮影点とより後ろに仮想カメラを設置

Fig. 12 After correction; upper: same camera position as Fig. 9, lower: further position than Fig. 9.



図 13 信濃町付近で撮影した画像を用いて作成した全方位画像
Fig. 13 Real panoramic image, SHINANO-MACHI.



図 14 3次元情報による補正前(実画像)
Fig. 14 Before correction.

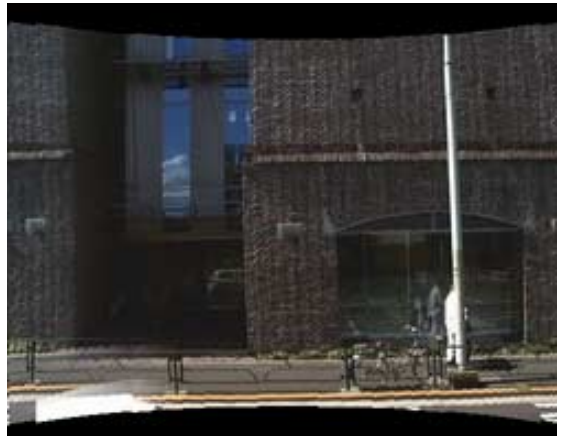


図 15 3次元情報による補正後(実画像). 上図は撮影点よりも前にカメラを設置(図14と同じ位置). 下図は撮影点とより後ろに仮想カメラを設置

Fig. 15 After correction; upper: same camera position as Fig. 14, lower: further position than Fig. 14.



(a)



(b)



(c)

図 16 オクルージョンの正確なレンダリング. 上から順にカメラが建物に向かって接近

Fig. 16 Demonstration of the correct rendering of the occluded area.

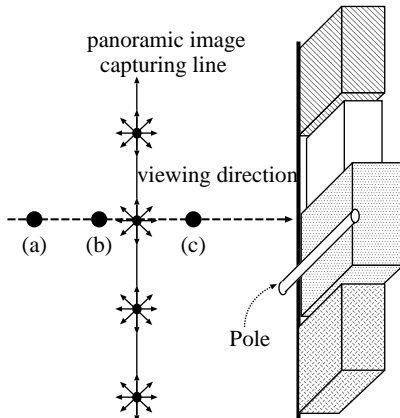


図 17 仮想カメラ位置

Fig. 17 Virtual camera position.

る仮想カメラを想定し（図 17 の (a), (b), (c)）画像をレンダリングしたものである。撮影経路からカメラ位置が離れているにもかかわらず、電柱や、建物のへこみに応じて視差が生じ、これらが正しく描かれているのが確認できる。なお、本節の生成画像において使用したコンピュータのスペックは、CPU が UltraSPARC-II (400 MHz) で、メモリが 1536 MB である。画像生成時間は、各画像とも約 0.5 秒から約 1 秒であった。また、図 15 下図において電柱が二重に見えるが、これはパノラマ画像生成時に 3.1.2 項で述べた効果によりできた歪みである。

6. 結 論

本研究において、筆者らはイメージ・ベースト・レンダリング (IBR) 手法に基づいた、新しい仮想空間の生成手法、特に都市空間などの広域仮想空間を生成する効率的な手法を提案し、その検討および実験を行った。光線空間を記述するための画像の取得は、道路をただ 1 回走行しながら全方位画像を撮影するだけであり、非常に簡単である。またそのレンダリング手法も、光線空間の考え方に基づき、蓄積してある画像から最も近い光線を選択する（具体的には、全方位画像からスリットを切り出し再構成する）という非常に単純な手法である。

本システムの特徴を以下にまとめる。

- (1) イメージ・ベースト・レンダリングによる生成（写実的な画像生成が可能）
 - … イメージ・ベースト・レンダリングによる画像生成は 2 章で述べたように様々な利点があり、本システムにおいてもそれら利点そのままではまる。特に、リアリティの高い仮想空

間を生成する際に有効である。

- (2) 広範囲の仮想空間（任意視点）
 - … 3.3 節で詳述したように、このシステムを用いれば、原理的には地平面上の任意の地点から、任意の方向を向いた視界を生成することができる。すなわち、これまでの主な IBR の各手法に比べてスケールの大きな仮想空間を生成することが可能である。
- (3) 計算プロセスが単純（リアルタイム・レンダリングの可能性）

… 生成する仮想空間が非常に広いにもかかわらず、光線空間を記述するための画像取得は、ただ 1 度全方位画像を撮影しながら走行するだけと簡単である。またレンダリングのプロセスも単純である。その結果、リアルタイム・レンダリングの可能性を十分秘めている。リアルタイムで写実的な画像を生成することは、現実感の豊かな仮想空間を構築する際に必須である。

本システムには以上述べたような特徴があるが、IBR による仮想空間の生成には光線空間が足りない場合に、生成画像にひずみが生じてしまうことがある。そこで本研究では、都市空間の特徴（本論文では 3 次元情報）を利用することで歪みを解消する手法を提案した。本論文で利用する 3 次元形状は簡単に得ることができ、しかも都市空間の多くの場面で適用することができる。

以上のような手法を提案し、シミュレーション画像、および車載型全方位画像撮影システムによる全方位実画像を用いて実験を行ったところ、生成画像の歪みが大幅に軽減し、本手法の有効性を確認することができた。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（創成的基礎研究費・課題番号 09NP1401）による。また、映像の取得に関して MR 研の方々に協力していただいた。ここに厚く感謝申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Adelson, E.H. and Bergen, J.: *The Plenoptic function and the elements of early vision*, pp.3-20, MIT Press, Cambridge, MA (1991).
- 2) Antone, M. and Teller, S.: Automatic Recovery of Relative Camera Rotations in Urban Scenes, *CVPR*, Vol.2, pp.282-289 (2000).
- 3) Chai, J., Tong, X., Chan, S.-C. and Shum, H.-Y.: Plenoptic Sampling, *ACM SIGGRAPH*, pp.307-318 (2000).
- 4) 山口晃一郎, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和:

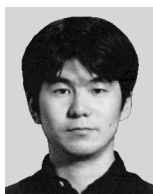
全方位動画をを用いた任意方向両眼ステレオ画像の実時間生成と提示, 信学技報, PRMU99-159 (1999).

- 5) Gortler, S.J., Grzeszczuk, R., Szeliski, R. and Cohen, M.F.: The lumigraph, *ACM SIGGRAPH*, pp.43-54 (1996).
- 6) Heigl, B., Koch, R., Pollefeys, M., Denzler, J. and Gool, L.V.: Plenotic Modeling and Rendering from Image Sequence taken by a Hand-Held Camera, *German Society for Pattern Recognition*, pp.94-101 (1999).
- 7) 広瀬通孝, 遠藤隆明: Building a Virtual World from the Real World, *International Symposium on Mixed Reality*, pp.183-197 (1999).
- 8) Kang, S.B., Szeliski, R. and Anandan, P.: The Geometry-image representation tradeoff for rendering, *IEEE Int. Conf. Image Processing*, Vancouver, BC, Canada, Vol.2, pp.13-16 (2000).
- 9) 加藤浩仁, 石黒 浩, マシューバース: Town Digitizing —全方位カメラと GPS による実時間モデリング, 情報処理学会研究報告, CVIM-125, pp.111-118 (2001).
- 10) Kawasaki, H., Yatabe, T., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: Construction of a 3D city map using EPI analysis and DP matching, *Asian Conf. Computer Vision*, Vol.2, pp.1149-1155 (2000).
- 11) Levoy, M. and Hanrahan, P.: Light field rendering, *ACM SIGGRAPH*, pp.31-42 (1996).
- 12) 苗村 健, 原島 博: Ray-Based Creation of Photo-Realistic Virtual World, *Virtual Reality and MultiMedia*, pp.59-68 (1997).
- 13) Shum, H.-Y. and He, L.W.: Rendering with Concentric Mosaics, *ACM SIGGRAPH*, pp.299-306 (1999).
- 14) Takahashi, T., Kawasaki, H., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: Rendering with Panoramic Images, 情報処理学会研究報告, CVIM-119, pp.33-40 (1999).
- 15) Takahashi, T., Kawasaki, H., Ikeuchi, K. and Sakauchi, M.: Arbitrary View Position and Direction Rendering for Large-Scale Scenes, *CVPR*, Vol.2, pp.296-303 (2000).

(平成 13 年 3 月 1 日受付)

(平成 13 年 8 月 26 日採録)

(担当編集委員 横矢 直和)



高橋 拓二

1999 年東京大学工学部電子情報

工学科卒業。2001 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程修了。現在, 東京ガス勤務。

主として画像処理, イメージベース



川崎 洋(学生会員)

1994 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2000 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻修士課程修了。現在, 同大学院博士課程在学中。主として画像処理, 3 次

元モデリング, CG に関する研究に従事。



池内 克史(正会員)

1973 年京都大学工学部機械工学科卒業。1978 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。MIT 人工知能研究所, 電総研を経て 1986 年 CMU 計算機科学

科およびロボティクス学科研究教授 (Principle Research Scientist)。1996 年より東京大学生産技術研究所教授。人間の視覚機能, 明るさ解析, 物体認識, 人間による組み立て作業の自動認識などの研究に従事。工学博士。D. Marr 賞 (ICCV: 1990), IEEE 優秀論文賞 (CVPR: 1991), 最多引用論文賞 (AI Journal: 1992) 等受賞。IEEE, 日本ロボット学会各会員。



坂内 正夫(正会員)

1975 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年東京大学工学部電気工学科専任講師, その後, 横浜国立大学工学部情報工学科助教授, 東京大学生産技術研究所助教授

を経て, 現在, 同大学生産技術研究所教授。1998 年より同大学生産技術研究所所長。マルチメディアデータベースなどの研究に従事。工学博士。