

平成21年6月1日現在

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2007～2008
課題番号：19560375
研究課題名（和文） 新しい原理に基づく光線空間情報リアルタイム取得装置の研究
研究課題名（英文） A Novel Real-Time Ray-Space Acquisition System
研究代表者
藤井 俊彰 (FUJII TOSHIAKI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：30273262

研究成果の概要：

本研究では新しい原理に基づく「光線空間カメラ」の研究を行った。光学系による光線の制御と2次元イメージャの後段の信号処理とを組み合わせることによって、原光線情報を復元する新しい光線取得原理を開拓した。光線空間データをラドン変換したデータのうち、光線空間の軌跡の直線性の強い領域だけについて投影データを取得し、これから原光線データを復元する手法を確立し、最大で1画素あたり約10本の光線に相当するデータを取得することに成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，通信・ネットワーク工学

キーワード：光線空間，取得装置，ラドン変換，光線制御光学系，2次元イメージャ，リアルタイム信号処理

1. 研究開始当初の背景

実写の3次元視覚情報を記述する手法として「光線空間法」がある。これは、空間を伝播する光線をパラメータ表現し、その一本一本に輝度値を付与した空間を定義するものであり、静止画の場合には4次元の空間上で定義されたRGB値で表現される。コンピュータ・グラフィックス(CG)の分野ではLight Field Renderingと呼ばれ、フォト・リアリ

スティックな映像生成法として広く知られている。一方、実写3次元シーンの光線空間情報を取得するのは非常に困難で挑戦的な課題であり、未だ実現されていない。理論的には「数mmという極小間隔でカメラを配列させて撮影した動画像」を取得することに相当し、これを実現する装置は開発されていない。

従来の3次元空間情報の入力装置としては、多視点カメラが最も一般的に研究されて

きていた。米国スタンフォード大、名古屋大、カーネギーメロン大では数十～百視点の多視点カメラが開発されている。米国スタンフォード大では Light Field Camera と称して 128 眼の MPEG-2 圧縮映像を取得できる装置を開発している。名古屋大学では申請者らのグループが中心となり 21 世紀 COE プログラム「社会情報基盤のための音声・映像の知的統合」のもと、100 眼の非圧縮映像を 1 時間程度取得可能な装置を開発した。また、東京大学やスタンフォード大では、インテグラル・フォトグラフィ (Integral Photography; IP) と呼ばれる 3 次元画像の手法を応用し、レンズアレイをカメラの前段に置くことにより、1000 眼を超える眼数の動画像を取得するシステムを開発している。

しかしながら、これらの従来研究を光線空間の取得装置という観点から見た場合、原理上、各軸における解像度が決定的に不足してしまうという欠点を持つ。多視点カメラを用いた方式では、1 眼当たりの解像度は高いものの、カメラの物理的サイズの制限により視点間隔が最小でも数 cm となり視差方向の解像度が不足する。一方の IP を用いた方式では、多数のレンズアレイにより 2 次元画像化されたものを最終段で 2 次元カメラを用いて取得するため、視点数と逆比例して 1 眼当たりの空間解像度が極端に低下し、数十×数十ピクセル程度になってしまう。また申請者らは、平成 16 年度～17 年度、若手研究 (A)「実写空間アーカイブシステムの基礎研究」において、走査によって視点方向を変えつつ高速度カメラで像を撮影することにより解像度の問題の解決を図った光線空間取得装置を開発したが（「3 次元画像コンファレンス 2004」優秀論文賞受賞）、視点数を多くするためには高速度カメラのフレームレートを高くする必要があり、現状の高速度カメラでは光量が不足してしまう。

このように、光線空間取得装置の開発を困難とする本質的な問題は、原データが 4 次元のデータであるのに対し、最終段の光電変換装置は 2 次元のイメージャでしかなく、このイメージャの解像度によって取得しようとする光線空間全体の解像度が制限されてしまうことにある。上記いずれの従来研究をみても、結局は既存の 2 次元イメージャの 1 画素によって 1 本の光線情報を取得するという本質的な原理には何ら変わりはない。従っ

てこの原理に基づく限りイメージャの解像度を上げるしか解決法はないが、光線情報を取得するのに十分な解像度を得るのは製造技術の点から困難である。従って光線取得装置を考えるに当たっては、カメラというものの概念を根本から見直す必要があった。

2. 研究の目的

本研究では新しい原理に基づく「光線空間カメラ」の研究を行った。1 画素で 1 本の光線を取得するという従来のカメラの概念にとらわれず、光学系による光線の制御と 2 次元イメージャの後段の信号処理とを組み合わせることによって原光線情報を復元する新しい光線取得原理を探求する。具体的には、3 次元シーンから発せられた光線情報に対し、まず前段で走査光学系や高速空間光変調器を用いて光線を制御する。次に高速な 2 次元イメージャにより光線情報を電気信号に変換する。この信号は従来のように結像光学系による像の信号ではなく多数の光線の重畳情報である。最後に、前段の光学系の情報をパラメータとした信号処理を適用することによって原光線情報を復元する。このように、信号処理を行うことを前提として、光線制御光学系・2 次元イメージャ・信号処理装置の全体を一体とした新しい光線情報取得装置の原理の探究及び実証を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

新しい原理に基づく光線カメラの開発のため、まず従来の光学制御系、および信号処理による圧縮アルゴリズム等についてさまざまな検討を行う。光学制御系では、現状で利用できる走査光学系や高速空間光変調器、具体的には、ポリゴンミラー、ガルバノミラー、DMD (Digital Micro-mirror Device)、強誘電性液晶などを調査する。また、信号処理アルゴリズムとしては、変換符号化などの圧縮アルゴリズムの調査、2 次元フーリエ変換の性質、コンピュータ・トモグラフィのアルゴリズムの調査などを行う。さらに、光学系の設計と信号処理アルゴリズムの開発とを統合して研究し、これらの光学系を通して得られる信号から原光線情報を得るための具体的な信号処理アルゴリズムを研究する。

4. 研究成果

(1) 光線空間データの取得

光線空間とは、空間を伝播する光線をパラメータ表現し、その一本一本に輝度値を付与した空間を定義するものであり、静止画の場合には4次元の空間上で定義されたRGB値で表現される。いま、縦方向の視差を無視し、高さ一定の断面で切り出した2次元光線空間を考えると、図1のような断面図が得られる。これは、多数のカメラ間で定義されるエピポーラ線上のデータを切り出して並べたものと等価であり、エピポーラ平面画像(Epipolar Plane Image; EPI)と呼ばれている。直線カメラ配置において実空間中の一点を通る光線群はEPI上で直線になる。EPI上での直線と実空間中の光線群の関係は図のようになり、EPI上での直線の傾きが奥行きは実空間中では奥行きに相当する。本研究では、機械ステージとカメラを組み合わせて、まず図1のような光線空間データ(EPI)を取得し、実験データとした。

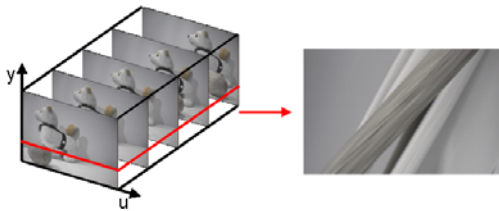


図1：光線空間の断面図

(2) ラドン変換の利用の検討

本研究では、ラドン変換・逆ラドン変換の利用を検討した。ラドン変換とは、ある2次元画像に対し投影データを求める積分変換である。2次元関数 $f(x, y)$ を直線に沿って積分することにより変換され、以下のような式で与えられる。

$$p(s, \theta) = \int f(s \cos \theta - t \sin \theta, s \sin \theta + t \cos \theta) dt$$

$$(x = s \cos \theta - t \sin \theta, y = s \sin \theta + t \cos \theta)$$

このように得られた値 $p(s, \theta)$ を投影データと言う。図2に投影データの取得の概念図を示す。この投影データに対し逆ラドン変換を行うことにより、2次元関数 $f(x, y)$ が復元される。

$$f(x, y) = \frac{1}{8\pi} \iint P(\omega, \theta) |\omega| \exp(i\omega x) d\omega d\theta$$

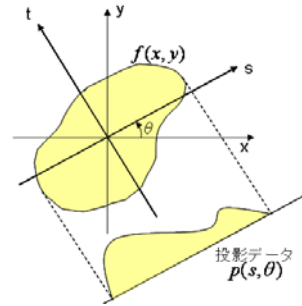


図2：投影データの取得

EPIにおけるラドン変換とは、ある角度の傾きを持った直線に沿った積分値であって、その直線上にある光線の輝度値を合計した値を $p(s, \theta)$ としたものである。そして、この投影データに逆ラドン変換を行うことにより、EPIが求まり光線空間が再構築される。

ラドン変換には中央断面定理という定理がある。それは、2次元画像のある方向への投影データのフーリエ変換は、2次元フーリエ平面における投影方向と直角な中央断面と等しくなるという定理である。

図1から分かるように、直線カメラ配置のEPIは直線構造からなっている。この直線構造に沿って積分された投影データは、逆ラドン変換をする為の多くの重要な情報を含んでいる。正確に言えば、直線構造に沿って積分した値が大きくなるため、中央断面定理によってその点の周波数成分が大きくなり、逆ラドン変換値に大きな影響を与えるということである。一方で、直線構造に沿っていない投影データはあまり重要な情報が含まれていない。そのため、直線構造に沿った投影データのみを取得し、光線空間を再構築することによって、1画素1本の光線にとらわれない、新しい原理に基づく光線カメラが構築できるのではないかという着想を得た。

(3) 光線空間の圧縮取得

本研究では、上記の考え方に基づいて、EPIに対してラドン変換をした投影データを直接取得できる光学系を考案することと、取得したサンプル数が原光線データのサンプル数より大幅に少なくできる手法を開発する、という2点を目標とした。

まず、ラドン変換をした投影データを直接取得する手法について述べる。直線カメラ配置により構築された光線空間の水平断面画

像(EPI)の投影データを直接取得するために、実空間と光線空間との関係、すなわち実空間中の一点を通る光線群は光線空間中で直線となる、という性質を用いる。位置、奥行き異なる点で、それぞれその点を通る光線群の輝度値の総和を取得することで投影データが得られる。実空間中のある一点を通る光線群の総和を取得するためには、フォトダイオードやCCD素子のようなイメージセンサを用いればよい。概念的には図3に示すように空間中のさまざまな位置に光センサを配置し、その出力を記録することで、投影データが得られることになる。

取得しなければならない光線群が通る点は様々な奥行きにあり、実際にその位置に光センサを動かすのは困難である。そこで、光線群を制御することによってイメージセンサを動かす必要のない光学装置を検討した。光学装置は図4のように、レンズと絞り、スリット、イメージセンサによって構成される。絞り・レンズを通った光線群はある一点に集光する。光線群が集光した点にスリットとイメージセンサを置くことにより光線群の輝度値の合計を取得することができる。異なった奥行き的一点から放射される光線群を取得するためには、レンズと絞りを移動させることにより、イメージセンサを動かさずに実現できる。このような装置を撮影面に対して平行に並べることにより、EPI上での投影データを取得することができる。

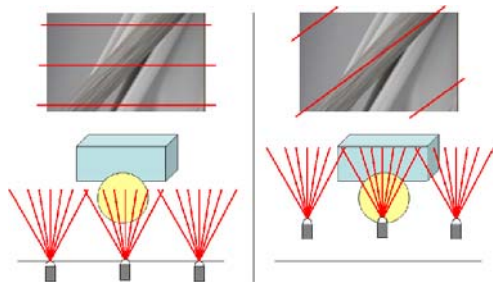


図3：投影データの直接取得

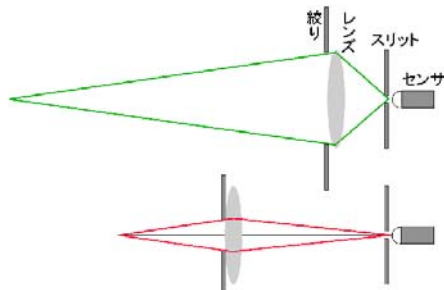


図4：集光点を变化させる光学装置

次に、取得したサンプル数が原光線データのサンプル数より大幅に少なくできる手法について検討した。これには、先に述べた直線構造に沿って積分された投影データは、逆ラドン変換をする為の多くの重要な情報を含んでおり、直線構造に沿っていない投影データはあまり重要な情報が含まれていない、という性質を利用する。すなわち、直線構造に沿った投影データのみを取得し、そのデータから光線空間を構築することによって、取得しなければならない情報量を減らすことができる。

本手法の有用性を示すために、実写画像に対しラドン変換を行った投影データを元に、光線空間の再構築を行った。用いる原投影データとしては0.5度間隔で得たものを用い、そのうちの一部のみから逆ラドン変換により光線空間データの復元を試みた。以下の3種類のデータセットを用いて実験を行った。

- 実験1. 0度～180度の投影データ
- 実験2. 20度～55度の投影データ
- 実験3. 20度～55度の投影データの
低周波域 ($\omega/\omega_{max} < 0.5$)

それぞれの実験に用いた画素数を、再構築した光線空間の画素数で割った値を表1に示す。また、用いた原画像、それぞれの実験結果を図5～8に示す。

表1：提案法による光線取得のサンプル数比

	実験1	実験2	実験3
用いた画素数/ 再構築した画素数	0.931	0.208	0.104



図5：原データ（1枚の視差画像）



図6：実験1の結果画像



図7：実験2の結果画像



図8：実験3の結果画像

実験1の結果では、問題なく光線空間を構築できた。これは、従来通り1画素ではぼ1本の光線情報を取得しており、光線空間を構築するための情報が十分にあったためであると考えられる。実験2、3では、奥行きの不連続なところでアーティファクトが表れた。0度から55度の投影データの中に光線空間を表現する重要な情報は含まれているため、およそその光線空間は構築できた。しかし、それ以外の投影データが奥行きの不連続さを表しており、その情報を削ってしまった為に実験2、3でアーティファクトが表れたと考えられる。実験2より実験3のアーティファクトが顕著なものも、同様の理由だと考えられる。

(4) 研究成果のまとめ

本研究では、光線空間の特徴に着目し、ラドン変換を用いて高能率な光線空間の取得方法を提案した。また、実験により、わずかな情報量で光線空間を再構成できることを示した。1画素で複数の光線情報を取得し逆ラドン変換を用いることにより、わずかな情報量の取得で光線空間が構築できる手法を提案した。また、実験により従来手法のおよそ10分の1の情報量の取得により、光線空間が構築できることを確認した。構築した光線空間は奥行きが不連続なところでアーティファクトが見られた。これは、奥行きの不連続な部分を表現するのに必要な投影データも削ってしまったためであると考えられる。今後は、必要な投影データの見直しや投影データの補間によって、より自然な光線空間取得を実現することが目標である。

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1件)

① Keiji Yamashita, Tomohiro Yendo, Masayuki Tanimoto, and Toshiaki Fujii “Compressive acquisition of ray-space using Radon transform,” Proc. SPIE Electronic Imaging, vol. 7237(CD-ROM), Jan. 2009, 査読有.

[学会発表] (計1件)

①山下敬司, 圓道知博, 谷本正幸, 藤井俊彰 “光線空間の高能率取得”, 平成20年度電気関係学会東海支部連合大会, 平成20年9月19日, 愛知県立大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 俊彰(FUJII TOSHIAKI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：30273262

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし