

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 21 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360151

研究課題名（和文） 次世代 3 次元画像通信のための光線取得のブレイクスルーの開拓

研究課題名（英文） Development of Breakthrough of Ray Capture for Next Generation 3D Visual Communication

研究代表者

谷本 正幸（TANIMOTO MASAYUKI）

公益財団法人名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：30109293

研究成果の概要（和文）：次世代 3 次元画像通信の実現に必須の技術である光線取得に関して、従来の多視点カメラ方式に代わる新しい光線取得方式の開発を目指し、「高密度全周光線取得」、及び「高能率光線取得」の新しい取得原理を研究した。高密度全周光線取得に関しては、傾斜楕円面鏡システムを考案し、歪の少ない縮小全周光線取得を実現した。高能率光線取得については、ラドン変換及びサイン曲線上の積分変換による光線取得手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：Ray capture is one of the key technologies for next generation 3D visual communication. “All-around dense ray capture” and “high-efficiency ray capture” are studied to develop a novel principle of ray capture as alternative to multi-camera ray capture. As for all-around dense ray capture, size-reduced ray capture with less distortion is realized by slanted ellipsoidal mirror system. Radon transform and integral transform along sinusoidal waves are developed for efficient ray capture.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011 年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2012 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

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：全周光線取得，高密度光線取得，高能率光線取得，回転走査ミラー，高速度カメラ，縮小像，ラドン変換，積分変換

### 1. 研究開始当初の背景

申請者らはユーザが自由に視点を移動させて 3 次元空間を見ることが出来る自由視点テレビ（Free-viewpoint Television, FTV）を提唱し、撮影から表示までのリアルタイムシステムの構築に世界で始めて成功した。さらに、FTV の標準化を動画像符号化の国際標準化機関である MPEG に提案し、FTV の第 1 フ

ーズとして多視点映像の圧縮符号化 MVC（Multi-view Video Coding）の標準化を成り立たせた。現在は FTV の第 2 フェーズとして、3 次元ディスプレイに表示するための 3DV（3D Video）の標準化を推進している。この過程で、ハイビジョンカメラ 100 台からなる多視点カメラシステムを構築し、光線取得の研究を行うとともに、多視点映像のテストシ

一ケンスを提供して、世界の多視点映像研究をリードした。このような申請者らの活動は、世界的に多視点映像や3次元テレビの研究が盛んとなる契機となった。

将来の画像通信では、3次元空間中の全ての光線を取得し伝達することとなる。この光線取得を多視点カメラで行うには、高解像度のカメラを多数必要とし、撮影装置も大規模となる。また、多数のカメラの同期をとり、位置合わせ、色合わせを精密に行わなければならない。さらに、カメラ間隔をカメラ寸法以下にはできないため、取得できない光線は周りの光線から補間によって生成する必要がある。このため、多視点カメラ方式に代わる新しい光線取得方式が強く求められている。光線取得は次世代3次元画像通信の実現にとって不可欠であるのみならず、コンピュータビジョンなどの分野においても重要で、学術的な価値が高い本質的な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究では、3次元空間中の全ての光線を伝達する究極の3次元テレビであるFTVにおいて、最大の課題となっている光線取得に関するブレークスルーを開拓することを目的とする。現在の光線取得の主流である多視点カメラ方式では、被写体が存在する空間にカメラを配置し、撮影画像の1画素で1光線を取得するため、高解像度のカメラを多数必要とし、撮影装置も大規模となる。本研究では、「高密度全周光線取得」、「高能率光線取得」という二つの新しい取得原理を研究し、多視点カメラ方式に代わる新しい光線取得方式の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 高密度全周光線取得

〔縮小系と時分割による高密度全周光線取得原理の構築〕

① 2枚の楕円面鏡を用いた光学系で縮小像を作り、これを撮影することにより光線を取得する装置の設計を行う。

② 設計された縮小光学系で得られる縮小像をレイトレーシング法により求め、縮小像を撮影することにより得られる光線と、実空間を撮影することによって得られる光線との対応関係を調べる。

③ 楕円面鏡で得た縮小像を撮影することにより得られる光線の歪みを明らかにする。

④ 様々な連続的な鏡面を用いた光学系に対して上記の検討を行い、光線の歪みの最も少ない鏡面を求める。

⑤ 縮小像を作成する光学系を決定する。  
〔高密度全周光線取得系の歪み補正と自由視点画像生成の研究〕

⑥ 高密度全周光線取得系について、様々な大きさや形状の物体に対して、走査ミラー像

を撮影することにより得られる光線と、実空間を直接撮影することによって得られる光線との対応関係を調べる。

⑦ 走査ミラー像を撮影することにより得られる像の歪みを分析し、物体の形状や位置に対する依存性が最も小さくなる光学系を求める。

⑧ 生成した光線空間から自由視点画像を生成し、その結果から光線が正しく得られているかどうか検証する。

⑨ 考案した高密度全周光線取得系について、様々な大きさや形状の物体に対して、走査ミラー像を撮影することにより得られる光線と、実物体を直接撮影することによって得られる光線との対応関係を調べる。

⑩ 走査ミラー像を撮影することにより得られる像の歪みの要因を分析し、物体の形状や位置に対する依存性が最も小さくなる光学系を研究する。

### (2) 高能率光線取得

〔直交光線空間の高能率光線取得原理の構築〕

① 多数の光線の重畳情報を取得し、それから原光線情報を復元する原理を研究する。

② 開発された原理をシミュレーション実験で検証する。

③ 取得すべきデータ量の削減や、自然な光線空間の復元のための諸条件を明らかにする。

④ 以上を繰り返し、高密度光線取得原理を構築する。

⑤ 原理を考案した直交光線空間の高能率取得方式について、レンズの可変焦点範囲、輝度の総和を取る光線の範囲などの方式パラメータと、取得データ量、復元された光線空間の精度などとの関係を調べる。

⑥ 取得すべきデータ量の削減や、自然な光線空間の復元のための諸条件を明らかにする。

⑦ 以上の結果をシミュレーション実験で検証する。

〔極座標光線空間の高能率光線取得原理の構築〕

⑧ 直交光線空間の高密度光線取得方式の原理を拡張し、全周の光線からなる極座標光線空間の高能率取得方式を研究する。光線データを変換して少ないデータ量で取得し、それから全ての極座標光線情報を復元するアルゴリズムを研究する。

⑨ 取得すべきデータ量の削減や、正確な光線空間の復元のための諸条件を明らかにし、シミュレーション実験で検証する。

⑩ 本研究で得られた知見を総合して整理し、光線取得技術の基礎資料として整備する。

## 4. 研究成果

(1) 高密度全周光線取得

物体の全周囲からの密な光線情報を取得するため、回転する走査ミラーと高速度カメラによって、時分割で高速に動的シーンを撮影する光線取得システムを研究した。

まず、放物面鏡を用いたシステムと楕円面鏡を用いたシステムを研究した。放物面鏡システムは、物体正面の全周囲から密な光線情報を取得できるが、走査ミラーと同程度の大きさの被写体しか撮影できない。一方、図1に示す楕円面鏡システムでは、ミラー2の下部の焦点に置かれた物体の縮小像がミラー1の上部の焦点にでき、これを回転走査ミラーで走査して撮影することにより、走査ミラーよりも大きい物体の撮影ができるようになった。しかし、図2に示すように取得画像に大きな歪みが生じる。これは、正面から直接撮影されたものに近い経路の光線を取得できないことが原因である。

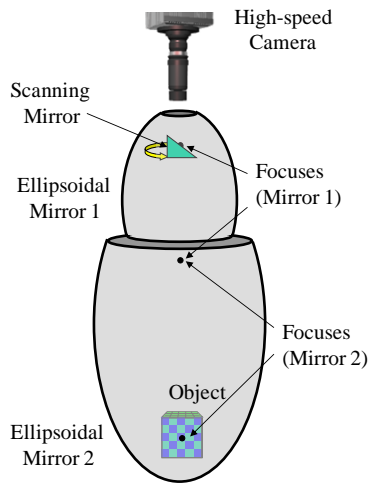


図1. 楕円面鏡システムを用いた縮小像の撮影による光線取得

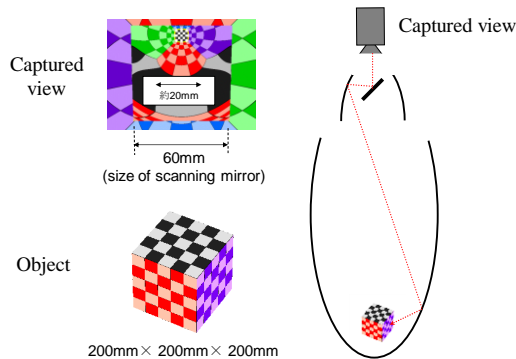


図2. 楕円面鏡システムの取得画像 (左上図) と光線経路 (右図)

そこで、縮小像を撮影することにより大きな物体が撮影でき、なおかつ楕円面鏡システムよりも正面から直接撮影されたものに近い経路の光線を取得できる新たな光線取得システムを研究した。

提案する傾斜楕円面鏡システムの構成と光線経路を図3に示す。提案システムは従来の楕円面鏡のシステムとは異なり、下部の楕円を傾けた状態で上部の楕円と焦点を共有させたものを、上部の楕円の2焦点を通る中心軸において回転させた形状の鏡面を利用する。これによって、斜めにした楕円の下部の焦点が被写体の正面に位置している状況を作り出している。楕円面鏡では、一方の焦点を通る光線はもう一方の焦点へ向かうように反射される。このため、被写体正面から出た光線が下部の楕円焦点を経由し、さらに共役した中央の焦点を経由して、最終的に上部の小さい楕円面鏡の一番上の焦点に結像することで、被写体の正面像の縮小光学像を作り出すことができる。

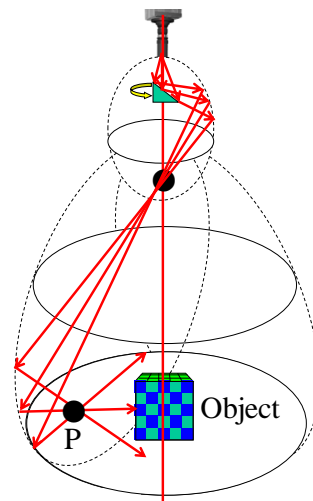


図3. 傾斜楕円面鏡システムと光線経路

傾斜楕円面鏡システムによる光線取得のシミュレーション実験を行った。提案システムの下部は楕円の中心軸を水平面に対して80度傾けたものを光学系中心軸の周りに回転して形成した回転体である。走査ミラー大きさは50mm x 50mm、角度は43度である。理想システムと傾斜楕円面鏡システムによる取得画像の比較を図4に示す。取得された像は走査ミラーに収まっており、縮小光学系として機能していることが分かる。また、楕円面鏡システムの取得像では上下に丸みを帯びて扇状に歪んでいたが、傾斜楕円面鏡システムでは上下方向の歪みが大幅に軽減され、台形状になった。これは取得される光線

の経路が縦方向においてより直接正面から取得したものに近い光線が取得されているためである。また、反射鏡面との距離を大きくとることができるため、被写体形状によって正面からの光線が遮蔽される問題も解決できた。

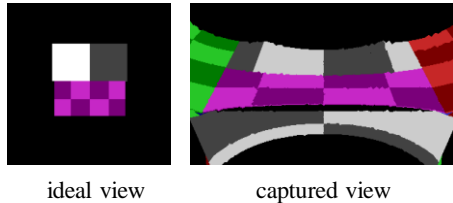


図4. 理想システムと傾斜楕円面鏡システムによる取得画像の比較

### (2) 高能率光線取得

光線空間を構築するには、多数のカメラを密に配置し、多くの光線情報を取得しなければならない。しかし、光線空間の冗長性を利用すれば、少ない取得情報で光線空間を構築できる可能性がある。ここでは、直線カメラ配置の場合の直交光線空間、及び空間円形カメラ配置の場合の極座標光線空間の高能率取得を研究した。

#### ① 直交光線空間の高能率取得方式

直交光線空間の高能率取得方式として、図5に示す、複数の可変焦点レンズと複数のフォトダイオードによって構成される方式を提案した。本方式では、一点を通る光線群をレンズで集光し、フォトダイオードによって光線群の輝度の和を取得する。レンズの焦点を変化させることにより、様々な点を通る光線群を画像データとして取得する。このように取得された一点を通る光線群は、光線空間の水平断面画像(EPI)では直線上にある光線群に等しい。EPIの直線上にある光線群の取得は、EPIの投影データを取得するラドン変換と等価であるため、取得画像データの逆ラドン変換によってEPIを復元し光線空間を構築することができる。

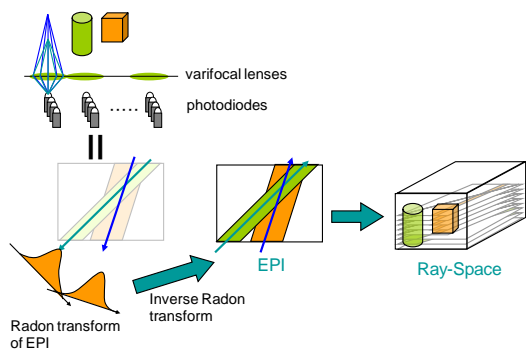


図5. ラドン変換を用いた直交光線空間の高能率取得.

直交光線空間の直線構造に沿って積分された投影データは、EPIを復元するための多くの重要な情報を含んでいる。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、取得データ量を減らした高能率取得を実現することができる。

図6に示す条件で、直交光線空間の高能率取得のシミュレーション条件を行った。

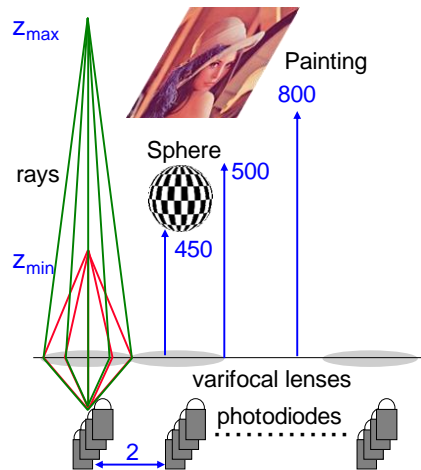


図6. 直交光線空間の高能率取得のシミュレーション条件

光線の取得範囲を変えた時の再生像を図7に示す。光線の取得範囲を物体が存在する範囲に制限することにより、8分の1のデータ量で像再生に必要な光線が取得できた。

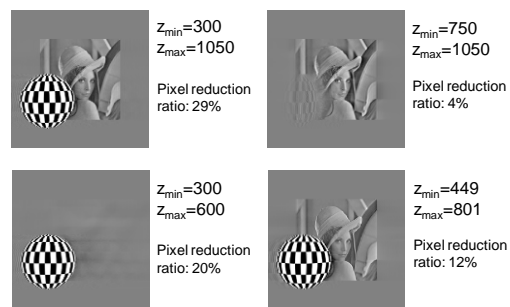


図7. 光線の取得範囲を変えた時の再生像

#### ② 極座標光線空間の高能率取得方式

極座標光線空間では1点を通る光線の軌跡はEPI上のサイン曲線となるため、これを利用する極座標光線空間の高能率取得方式を提案した。

円形カメラ配置の場合の積分変換を図8に示す。EPIを入力画像(図8左)とし、その上

に振幅、位相を与えて一周期分のサイン曲線を描き、サイン曲線上の画素の輝度値の積分を求める。これによって、横軸を位相、縦軸を振幅とする位相-振幅平面上の1点を得られる。これを繰り返し、振幅は1画素刻みでEPIの縦サイズの半分まで、位相は1画素刻みでEPIの横サイズのみだけ変化させると、位相-振幅平面の出力画像が得られる。このとき、振幅をEPIの縦サイズの半分しか変化させないため、出力画像の縦サイズは図8右に示すようにEPIの半分となる。

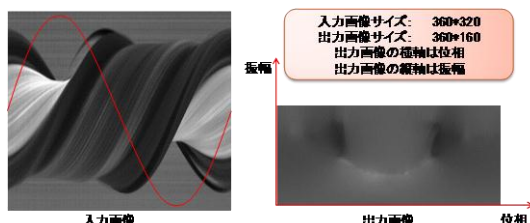


図8. 円形カメラ配置の場合の積分変換

EPIと同じサイズの変換画像を得るため、サイン曲線の上り部分のみ、及び下り部分のみを用いて積分変換した2枚の出力画像を作り、それらを結合したものを変換画像(図9右)とした。逆変換は逐次近似法によって行う。

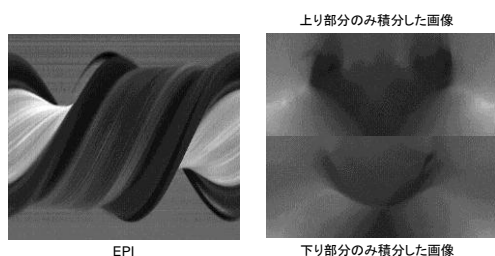


図9. EPI (左) と変換画像 (右)

円形カメラ配置で、対象物を全方向から1°刻みで360枚撮影した多視点画像からEPIを作り、すべての高さのEPIに対して変換、逆変換を行った。

逆変換では、まず、サイズがEPIと同じで、画素値が全て127の画像を復元画像の初期画像とする。この画像上に振幅と位相を与えてサイン曲線を描き、サイン曲線の上り部分と下り部分の各々の平均値を求める。その値と与えた振幅、位相に対応する変換画像の点の輝度値の差を求め、その差を復元画像に描いたサイン曲線の上り部分と下り部分に加算する。この操作をすべての位相と振幅に対して行うと、復元画像が更新される。この操作を繰り返すことでEPIが復元される。逐次近似によるEPIの復元過程を図10に示す。

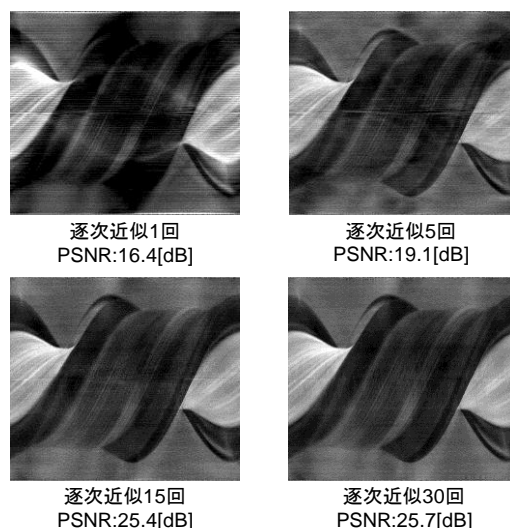


図10. 逐次近似によるEPIの復元過程

実カメラで取得した画像と本手法で取得した光線空間から生成した画像の比較を図11に示す。良好な画像が復元されていることが分かる。逐次近似の反復回数が30回するとき、復元画像のPSNRは26.3[dB]であった。

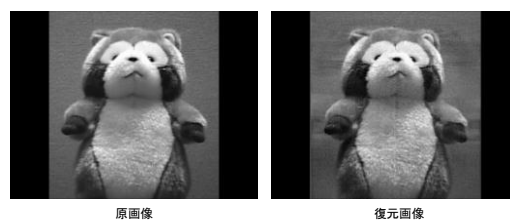


図11. 実カメラで取得した画像(左)と本手法で取得した光線空間から生成した画像(右)の比較

本研究により、極座標光線空間のEPIを様々な振幅と位相の正弦波上で積分して、可変焦点レンズとフォトダイオードアレイによる光線取得と等価な、振幅・位相平面の画像に変換し、この変換画像からEPIを復元する手法が開発できた。

## 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12件)

- ① Masayuki Tanimoto, Mehrdad Panahpour Tehrani, Toshiaki Fujii, Tomohiro Yendo, FTV for 3-D Spatial Communication, Proceedings of the IEEE, 査読有, Vol.100, 2012, pp.905-917.
- ② Masayuki Tanimoto, 3D Spatial Reproduction by FTV, Proc. of EVA 2012

- Florence, 査読有, 2012.
- ③ Masayuki Tanimoto, FTV: Free-viewpoint Television, Signal Processing: Image Communication, 査読有, 2012, pp.555-570, 10.1016/j.image.2012.02.016.
- ④ Masayuki Tanimoto, FTV (Free-viewpoint Television), APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, 査読有, Vol.1, 2012, pp.1-14, 10.1017/ATSIP.2012.5.
- ⑤ Masayuki Tanimoto, Ray Capture Systems for FTV, Proc. of APSIPA Annual Summit and Conference 2012, 査読有, 2012.
- ⑥ Masayuki Tanimoto, Dense and Efficient Ray Acquisition for FTV, Proc. of Collaborative Conference on 3D & Materials Research (3DMR) 2011, 査読有, 2011
- ⑦ Masayuki Tanimoto, FTV (Free-viewpoint Television) and Ray Technologies, Proc. of International Universal Communication Symposium (IUCS) 2011, 査読有, 2011
- ⑧ Masayuki Tanimoto, FTV and All-Around 3DTV, Proc. of Visual Communications and Image Processing (VCIP) 2011, 査読有, 2011
- ⑨ Shaojie Yang, Mehrdad PanahpourTehrani, Toshiaki Fujii, Masayuki Tanimoto, Compressive Acquisition of Ray-Space in Circular Camera Arrangement, Proc. of International Display Workshops (IDW) 2011, 査読有, Vol.18, 2011, pp.1131-1133.
- ⑩ Masayuki Tanimoto, FTV: Free-viewpoint Television, Signal Processing: Image Communication, 査読有, 2011, 10.1016/j.image.2012.02.016
- ⑪ Keiji Yamashita, Tomohiro Yendo, Mehrdad P. Tehrani, Toshiaki Fujii, Masayuki Tanimoto, High-efficiency acquisition of ray-space using radon transform, Proc. of SPIE, 査読有, Vol.7690, 2010, 76900K-1 76900K-9
- ⑫ Gentaro Takeda, Tomohiro Yendo, Mehrdad P. Tehrani, Toshiaki Fujii, Masayuki Tanimoto, All-around convergent view acquisition system using ellipsoidal mirrors, Proc. of SPIE, 査読有, Vol.7690, 2010, 76900L-1 76900L-9

[学会発表] (計3件)

- ① 楊少傑, 圓道知博, パナヒブルテヘラニメヒルダド, 藤井俊彰, 谷本正幸, 区間ラドン変換を用いた光線空間の再構築, 電気学会東海支部若手セミナー, 2011年3月1日, 名古屋
- ② 臼井俊介, パナプールテヘラニメヒルダド, 藤井俊彰, 谷本正幸, 極座標光線空間の高効率取得, 2012年映像情報メディア学会年次大会, 2012, 2012年8月30日, 広島
- ③ 伊藤圭介, パナプールテヘラニメヒルダド, 藤井俊彰, 谷本正幸, 縮小像のミラー走査による全周高密度光線取得, 2012年映像情報メディア学会年次大会, 2012, 2012年8月30日, 広島

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷本 正幸 (TANIMOTO MASAYUKI)  
 (財) 名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員  
 研究者番号: 30109293

### (2) 研究分担者

圓道 知博 (YENDO TOMOHIRO)  
 名古屋大学・工学研究科・助教  
 研究者番号: 70397470  
 メヒルダド・パナヒブルテヘラニ (MEHRDAD PANAHPOUR TEHRANI)  
 名古屋大学・工学研究科・講師  
 研究者番号: 70554830

### (3) 連携研究者

鈴木一克 (SUZUKI KAZUYOSHI)  
 (財) 名古屋産業科学研究所・その他部局等・研究員  
 研究者番号: 60436714