

## 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24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560387

研究課題名（和文）

光線空間情報の圧縮センシングの研究

研究課題名（英文）

A Study on Compressed Sensing of Ray-Space Data

研究代表者

藤井 俊彰 (FUJII TOSHIKI)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30273262

研究成果の概要（和文）：本研究では光線空間データに対する圧縮センシング（Compressed Sensing）の研究を行った。4次元空間上の直線群からなる光線空間データを対象として、これまで明らかにされている圧縮センシングの理論をさらに発展させた「光線空間の圧縮センシング」の理論の構築、体系化を行い、実験的に原理の検証を行った。光線空間データの周波数解析に基づいて標本化点数の下限を規定した Plenoptic Sampling の理論を圧縮センシングの観点から見直し、より少ない標本点数から原光線空間データを再構成できる理論の構築を行った。また、円形カメラアレイの場合についてどこまでデータ量が減らせるかを実験的に検証した。

研究成果の概要（英文）：In this research, we proposed a new compressive sensing method of Ray-Space in circular camera array. The compressive sensing utilizes special characteristics of Ray-Space that transformed data has sparse data structure. As the first step, we defined a new transform and inverse transform method between Ray-space and a new domain, where the amount of information can be efficiently reduced. We used an integral transform using the feature of Ray-space in polar coordinate system. We solved the problem of high computation cost by introducing successive approximation. In the experiment, we reduced low-frequency components of transformed data in the domain defined above, and confirmed that the original Ray-space data can be reconstructed with small error.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：情報通信工学

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：圧縮センシング，光線空間，Compressive Sampling, Compressed Sensing

## 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。

申請時においては、光線空間法に基づくレンダリング手法の有用性が広く認識されるにつれて、実写の光線空間情報をリアルタイムで取得する研究が注目を浴びていた。SIGGRAPH 2008 での Computational

Photography のチュートリアルにおいて、Computational Camera という名称で光線空間取得が非常に話題となっているほか、様々な国際会議における論文発表数も急激に増えつつある。光線空間情報の取得の本質的な困難さは、本来4次元のデータを CCD などの2次元イメージャで取得しようとするところにあり、最終段の取得デバイスの解像度の不足が決定的なボトルネックとなっていた。

この問題に対し、申請者は基盤研究 (C)、平成 19 年度～20 年度、「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」において、光線空間をラドン変換して取得するような光学系と、後段での信号処理を組み合わせる手法を提案し、従来よりも少ないサンプリング点数で圧縮取得できる方式を開発した。これは、1 光線を 1 画素で取得するという従来の取得の考え方を根本的に転換し、光線数より少ない画素数でサンプリングし、その後の信号処理を経て元の光線空間情報を復元するという新しいアプローチに成功したものである。

一方、2006 年頃に情報理論の分野から Compressed Sensing (または Compressive Sampling) と呼ばれる理論が提案された。これは  $n$  次元ベクトルで表される信号において非常に疎 (スパース) な点にしか有意な値がない場合、観測ベクトルと呼ばれる  $n$  次元ベクトルとの内積を  $m$  個 ( $m \ll n$ ) 観測した情報のみから、後段の信号処理によって原信号を一意的に復元できるという新しい理論である。この Compressed Sensing の理論は、申請者らが提案したラドン変換に基づく光線空間取得法と非常に密接な関係があると予想され、 $n$  次元観測ベクトルとしてラドン変換の核関数を適用したものに近いと思われる。しかしながら、直線群から構成されるという非常に強い構造性を持った4次元光線空間データにおいて Compressed Sensing 理論が要請する信号のスパース性が満たされているかどうかや、ラドン変換のような決定論的な核関数が Compressed Sensing 理論が要請する観測ベクトルの一様分布性 (インコヒーレンシー) に整合していない点など、両者の関係には未だよく分かっていない点が多く、これらを明らかにすることが求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究では光線空間データに対する圧縮センシング (Compressed Sensing) の研究を行う。Compressed Sensing の立場からは光線空間という独特の構造を持った信号に対する標本点数の下限を理論的に探究するという未解決のテーマがあり、一方の光線空間取得の観点からは、ラドン変換に基づく方

法を超えた新しい取得法の構成につながる可能性を秘めている。本研究では、4次元空間上の直線群からなる光線空間データを対象として、これまで明らかにされている圧縮センシングの理論をさらに発展させた「光線空間の圧縮センシング」の理論の構築、体系化を行い、プロトタイプ試作を通して原理の検証を行う。光線空間の標本化・再構成に関する理論としては、従来より Plenoptic Sampling の理論があり、光線空間データの周波数解析に基づいて標本化点数の下限を規定したものとして知られている。本研究では Plenoptic Sampling を圧縮センシングの観点から見直し、より少ない標本点数から原光線空間データを再構成できる「Compressive Plenoptic Sampling 理論」の構築を目指す。さらに、この理論に基づいて実写の光線空間データに対する圧縮センシングの装置を試作し、様々な実物体の光線空間データに対する標本化、再構成の実験を行って、原理の検証を行う。実データにはノイズの混入が不可避であり、Compressed Sensing の理論ではノイズに対する耐性についても理論的上限が押さえられている。光線空間データ取得時におけるノイズ量についても実験を通して定量的評価を行い、構築する理論に組み込むとともに、圧縮センシング装置における実験的評価を行って、光線空間の圧縮センシング理論の基礎資料として整備することを目的とする。

## 3. 研究の方法

初年度には、前半で光線空間取得装置の構築を行う。これは、1 画素で 1 光線を取得する従来の原理に基づくものであり、後の圧縮センシング取得理論の構築際の基礎データを取得することが目的である。それと共に、ノイズのない光線空間データを生成するためのシミュレーションプログラムも開発する。初年度後半には、構築した光線空間取得装置およびシミュレータを用いて、様々な実光線空間データの取得・解析を行う。具体的には以下の計画に従って研究を進めていった。

- (1) パーソナルコンピュータ、高速度映像取り込みボードを購入し、現有設備である高速度カメラと組み合わせて光線空間取得装置のプロトタイプを構築する。
- (2) 現有設備である光学定盤上に、レンズ・ミラー類、ガルバノスキャナ、ポリゴンミラー等からなる光学系を構築する。
- (3) (2)の光学系と(1)の取得装置を組み合わせ、光学系のパラメータを変化させることによって様々な条件下で光線空間データを取得できる装置に発展させる。
- (4) レイ・トレーシングプログラムを応用し

て、3次元物体データからノイズのない光線空間データを生成するシミュレーションを行うプログラムを開発する。この開発に当たって購入設備備品であるパーソナルコンピュータを用いる。

- (5) (3)の装置を用いて、さまざまな3次元物体を対象に光線空間データの取得実験を行う。同時に、(4)で構築したシミュレータを用いてノイズのない光線空間データの生成を行う。
- (6) (5)で得られた光線空間データを解析する。新理論構築に向けた第一歩として、Plenoptic Sampling 理論が要請する条件下で、光線空間の標本化・再構成の実験を行い、評価する。

次年度以降には、Plenoptic Sampling を圧縮センシングの観点から見直し、より少ない標本点数から原光線空間データを再構成できる Compressive Plenoptic Sampling 理論の構築を目指す。さらに、この理論に基づいて実写の光線空間データに対する圧縮センシングの装置を試作し、様々な実物体の光線空間データに対する標本化、再構成の実験を行って、原理の検証を行う。具体的には以下の計画に従って研究を進めていった。

- (7) 4次元光線空間の直線群からなるという性質を数学的に定式化し、Compressed Sensing の理論を拡張して光線空間における圧縮センシングの理論を構築する。この点が3年間に渡る研究の主要な部分であり、多くの時間をかけて厳密に進めて行く。
- (8) 光線空間データ取得時におけるノイズ量について実験を通して定量的評価を行い、構築する理論に組み込む。ノイズの大きさ(SNR)に応じて必要とされる標本化点数の下限が押さえられることが予想されており、これを平成21年度に構築した装置を用いて実験的に検証するとともに、理論的限界を求める。
- (9) 取得ノイズに関連する理論には大数の法則に基づく確率的な考察が必要なことから、大容量ハードディスクドライブ、高速画像処理用ソフトウェアを用いて多くの光線空間について実験を重ね、(8)の結果を検証していく。
- (10) 構築した理論に基づいて実写の光線空間データに対する圧縮センシングの装置を試作し、様々な実物体の光線空間データに対する標本化、再構成の実験を行って、原理の検証を行う。
- (11) 以上の知見をまとめ、光線空間の圧縮センシング理論、およびそれに基づく圧縮センシング装置の基礎資料として整備する。

#### 4. 研究成果

光線空間を任意の水平断面で切り取ることで得る画像を Epipolar Plane Image (EPI) という。この EPI 上で圧縮センシングを考える。EPI の性質として、直交座標系での EPI においては実空間中の一点を通る光線の軌跡は直線を描き、実空間中の奥行きが EPI 上の直線の傾きに対応すること、円形カメラレイでの EPI においては実空間中の一点を通る光線の軌跡はサインカーブを描くことが知られている。本研究では、EPI 上において実空間中の一点を通る光線の輝度値の和を計算し、これを新たな変換領域として定義する。入力された EPI 上に振幅、位相を指定して一周期分のサインカーブを振動の中心が EPI の中心になるように描き、描いたサインカーブ上の画素の輝度値の和を求める。振幅と位相を適切に変更し、変換行列がフルランクと見なせるようにする。

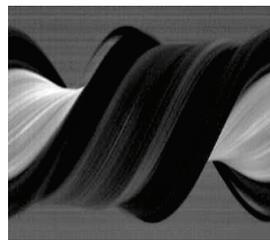


図1: EPI の例

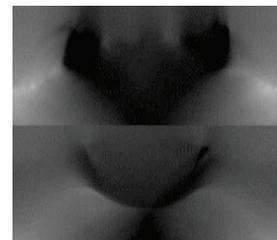


図2: 変換領域

変換領域の画像を EPI に再構成する手法を考える。変換は一次変換で表せるため、変換行列の逆行列を求めれば再構成することが可能である。しかし、ここで問題となるのは、変換行列の行・列のサイズが、それぞれ EPI の全画素数分と非常に大きくなり、通常使われる Gauss-Jordan 法などの手法で逆行列を求めることが困難である。高次元逆行列問題を解くため、本研究では逐次近似法による反復法を用いた再構築手法を新たに導入した。再構成した EPI の PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) は、反復回数 1 回、5 回、15 回、30 回でそれぞれ 16.4, 19.1, 25.3, 25.68 [dB] であった。

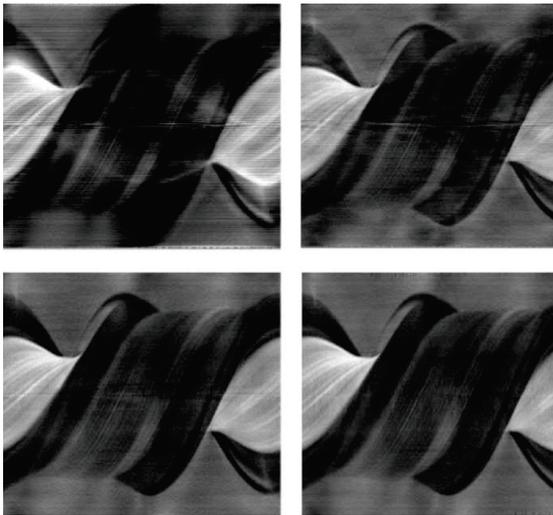


図 3:再構成した EPI  
(左上から順に反復回数 1, 5, 15, 30 回)

円形カメラアレイで 1 度ずつ 360 枚撮影した画像を、すべての高さの EPI に対して変換、再構築を行い、画像の再構築を行った結果の画像を図 4 に示す。原画像の PSNR の平均値は 26.31[dB] であった。

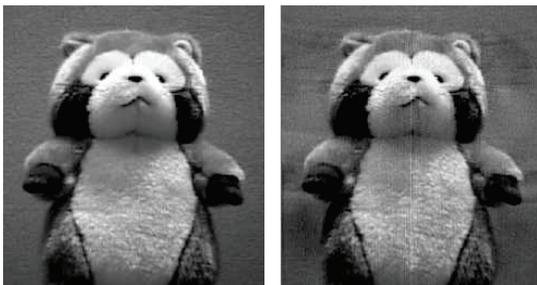


図 4:原画像 (左) と再構成画像 (右)

EPI 上に様々な振幅、位相のサインカーブを描いて変換は行われるが、サインカーブの中には物体の情報を多く含むものと多く含まないものがある。よって変換画像から物体の情報をほとんど含まないサインカーブから得た部分を削減しても EPI はほぼ再構築できると考えられる。入力された EPI はサインカーブの上り部分に物体の情報を多く含んでいるため、変換画像の低周波部分かつ、サインカーブの下り部分から取得した部分は有効な成分をほとんど含んでいないと考えられる。実証のため、変換画像のサインカーブの下り部分から取得した部分かつ主観的に低周波と見なせる部分を同一の画素値として EPI の再構築を行い、変換画像を処理せずに再構築した画像と比較した。逐次近似の回数は 30 とした。また、同一の画素値とする部分は、(1) 小サイズ(20\*20pixel), (2) 中サイズ(40\*40pixel), (3) 大サイズの正方形(60\*60pixel) の 3 パターンとした。

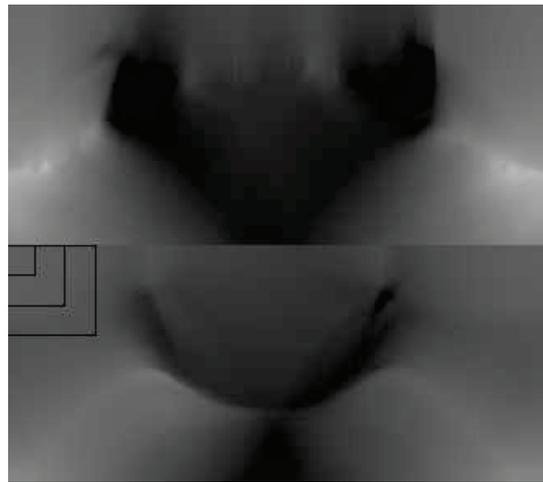


図 5: 変換領域と、圧縮センシングに用いる領域 (小, 中, 大)

実験結果を図 6 に示す。パターン(1)の再構築画像は通常のものとはあまり差異は見られないが、パターン(2)の再構築画像にはサインカーブの下り部分の形をした筋が出ている。また、パターン(3)の再構築画像にはそれが更に顕著に見える。これらのことから低周波部分を同一の画素値として再構築することはできるが、主観的に低周波と見なせる部分を同一の画素値とできるほど大まかに削減することができないことが分かる。よって、「低周波」とみなす区画の判定が繊細であると言える。

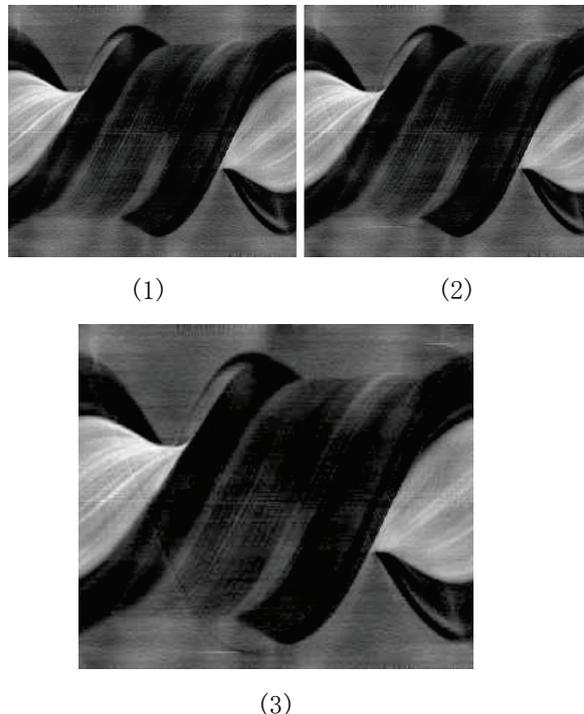


図 6: 変換領域のサイズと再構成した EPI  
(1):小, (2):中, (3):大)

本研究では線形カメラアレイ EPI でのラド

ン変換に変わる新たなEPI変換手法を提案した。逆変換には高次元逆行列問題を解く必要があったが、逐次近似法を用いた逆変換手法を提案し、この問題を解決した。また、変換したデータの情報量を削減する手法を提案し、実証のための実験を行い、変換データの低周波成分には有用な情報が含まれないことを示した。

#### 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6件)

- ① Takehiro Yamada, Toshiaki Fujii, “Multiview Image Compression Based on a New Basis Representation,” IS&T/SPIE Electronic Imaging, 査読有, Vol. 7863-13, 2011.  
[http://spiedigitallibrary.org/proceedings/resource/2/psisdg/7863/1/78630E\\_1?isAuthorized=no](http://spiedigitallibrary.org/proceedings/resource/2/psisdg/7863/1/78630E_1?isAuthorized=no)
- ② Takehiro Yamada, Toshiaki Fujii, “A New Basis Representation for Multiview Image,” International Workshop on Advanced Image Technology, 査読有, 2011.  
<http://iwait2011.unimedia.ac.id/>
- ③ Takehiro Yamada, Toshiaki Fujii, “A New Basis Representation for Multiview Image Using Directional Sampling,” The 17th International Display Workshop, 査読有, pp. 1309-1312, 2010.  
<http://fit.mmu.edu.my/iwait2010/accepted.html>
- ④ Keiji Yamashita, Tomohiro Yendo, Mehrdad P. Tehrani, Toshiaki Fujii, and Masayuki Tanimoto, “Data Reduction at the Acquisition of Ray-Space in Linear Camera Arrangement,” International Workshop on Advanced Image Technology 2010, 査読有, p. 117, 2010.  
<http://fit.mmu.edu.my/iwait2010/accepted.html>
- ⑤ 山下 敬司, 圓道 知博, Mehrdad P. Tehrani, 藤井 俊彰, 谷本 正幸, “ラドン変換を用いた光線空間取得におけるデータ量の削減,” 映像メディア処理シンポジウム講演論文集, 査読無, pp. 141-142, 2009.  
<http://www.pcsj-imps.org/2009/program2009.pdf>
- ⑥ 山下 敬司, 圓道 知博, Mehrdad P. Tehrani, 藤井 俊彰, 谷本 正幸, “ラドン変換を用いた光線空間の高能率取

得,” 3次元画像コンファレンス講演論文集, 査読有, pp. 21-24, 2009.

<http://www.3d-conf.org/xdata/3D2009program.pdf>

[学会発表] (計5件)

- ① 白井 俊亮, 藤井 俊彰, Mehrdad Panahpour Tehrani, 谷本正幸, “円形カメラアレイにおける光線空間の圧縮センシング,” 3次元画像コンファレンス 2012, 2012年7月13日, 早稲田大学(東京都).
- ② Shaojie Yang, Toshiaki Fujii, Mehrdad Panahpour Tehrani, Masayuki Tanimoto, “Compressive Acquisition of Ray-Space in Circular Camera Arrangement,” The 18th International Display Workshops, Dec. 8th, 2011, 名古屋国際会議場.
- ③ Toshiaki Fujii, “Ray-Space Acquisition System for 3DTV - 100-Camera and Ray-Based Acquisition Systems -,” International Universal Communication Symposium (IUCS) 2011 (招待講演), Oct. 13th, 2011, Gumi Convention and Exhibition Center (Korea)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 俊彰 (FUJII TOSHIAKI)  
名古屋大学・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