

三次元テレビジョンシステム

谷本正幸

Three-Dimensional Television System

Masayuki TANIMOTO

FTV (Free Viewpoint Television) enables us to view a real 3D world freely by changing our viewpoints as if we were there. FTV is an ultimate 3D TV and positioned as the top of all image media thanks to its largest space of representation. FTV can generate free viewpoint images from finite number of captured images. This function of FTV is needed by all 3D TV systems.

Key words: Free Viewpoint TV, FTV, ray-space, ray-reproducing FTV, ray-based image engineering, 3D TV

1926年の高柳健次郎博士による世界初の電子式白黒テレビ受像実験の成功以来、テレビ技術者は実世界をリアルに再現することを目指し、カラー化や、走査線1125本のハイビジョン、走査線4000本のスーパーハイビジョンなどの高精細化を実現してきた。この80年の間にテレビ技術は飛躍的な進歩を遂げたが、今なお実現に至っていないことがある。現実の世界では、私たちは移動したり視線を動かしたりして、さまざまな視点から視覚情報を得ている。しかし、これまでのテレビでは、それを見ている私たちがどのように視点を変えても同じシーンしか見ることができない。すなわち、20世紀のテレビが実現したものは、1視点の映像の伝達であり、しかもユーザーは自分の意志でその視点位置を変えることができない。これは現実の世界で体験していることとはまったく異なるものであり、21世紀に解決すべきテレビの最重要課題である。

21世紀には、テレビはこの制約を打ち破り、ユーザーがあたかもその場にいるかのように、自ら視点を移動して遠隔地の情景を見ることができるようになる。このような、ユーザーが自ら自由に視点を移動して三次元シーンを見ることができるといった新しい映像メディアが、自由視点テレビ (free viewpoint TV: FTV)¹⁻⁵⁾である。

複数の視点をもつテレビとして、2眼式や多眼式の三次

元テレビがある。2眼式の三次元テレビでは、隣接2視点で撮影した2つの映像を左右の眼に呈示することにより、立体視ができる。多眼式の三次元テレビでは、もっと多くの視点で撮影するので、ある範囲内では視点を変えながら立体視ができる。しかし、立体視するかどうかは表示の問題であり、三次元テレビとしての本質はどれだけの視点数の映像をもっているかという点にある。

筆者らは、FTVを構築するための技術開発を進め、有限視点の画像情報から無限視点の画像情報を信号処理によって作り出すことにより、無限視点をもつFTVの撮像から表示までのリアルタイム実験に世界ではじめて成功した^{6,7)}。これによって、自由視点テレビという新しい映像メディアの実現性を実証した。

FTVは、経済産業省、JEITA、および各社の支援を受けてMPEGに提案され、最も挑戦的な三次元映像メディアとして高く評価された。現在、MPEGは、FTVの入力信号である多視点映像の圧縮符号化の標準化を進めている。

無限個の眼をもつ時空間映像システムであるFTVは、写真、映画、テレビと発展してきた映像技術の頂点に立つものである。FTVによって、実世界の完全な記録や時空間での自由な表現が可能となり、新しい文化や芸術が創造

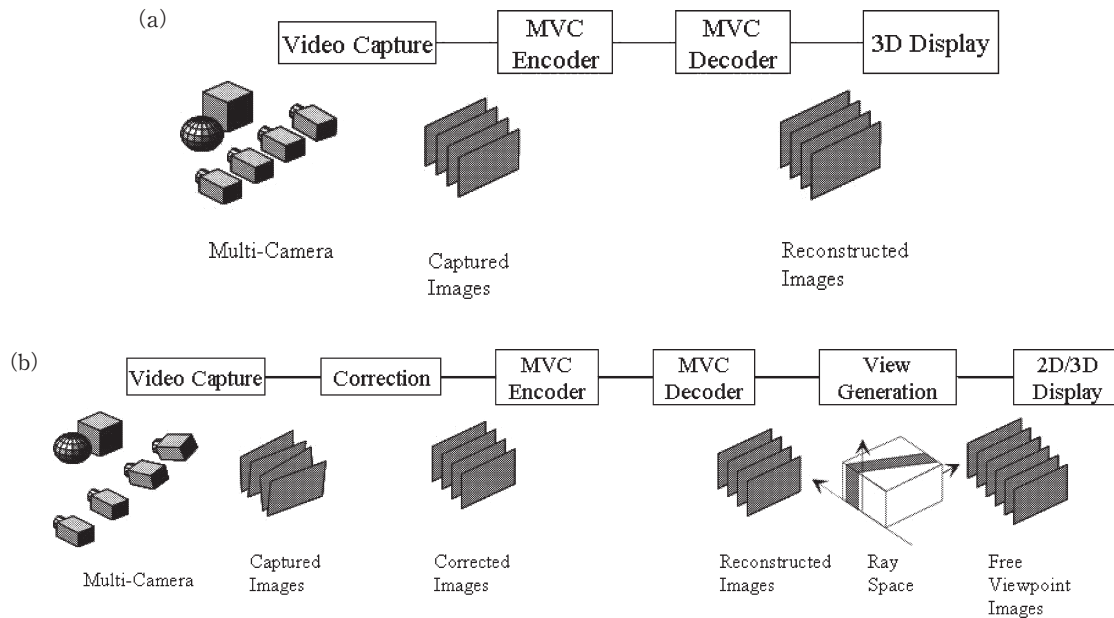


図1 三次元テレビとFTVの構成。(a) 三次元テレビの構成：撮影と表示が1対1に対応，(b) FTVの構成：撮影と表示の組み合わせが自由。

される。

本稿では、三次元テレビとFTVの関係、FTVの実現手法、FTVシステム、FTVを支える光線取得・表示技術について紹介する。

1. 三次元テレビと自由視点テレビ

三次元テレビとFTVの構成をそれぞれ図1(a)，(b)に示す。

図1(a)の三次元テレビでは、多眼カメラでシーンを撮影し、これを同じ眼数の三次元ディスプレイで表示する。すなわち、この構成では撮影の眼数（視点数）と表示の眼数（視点数）が同じであり、撮影と表示が1対1に対応している。

しかし、これでは表示と同じ条件で撮影された三次元コンテンツしか利用できず、不便である。三次元テレビを普及させるには、同一の三次元コンテンツを、眼数や視域の異なるさまざまな三次元ディスプレイで表示できるようにしなければならない。このため、撮影と表示を独立にして、撮影した映像からカメラ位置以外の視点の映像を作り出し、表示デバイスに合うように変換する必要がある。

一方、図1(b)のFTVでは、撮影と表示が独立になっている。送信部では、多眼カメラで三次元シーンを撮影し、位置合わせや色合わせを行って受信部に伝送する。受信部では、送られてきた多視点画像をもとにして必要な視点の画像を作り出し、これを表示する。FTVは、実三次元空間情報を伝達・記録する究極の三次元テレビであると

ともに、どのような二次元、三次元ディスプレイにも接続できる。

最近では、撮影と表示が独立で、撮影した映像を表示デバイスに合うように変換する三次元テレビも現れている。たとえば、文献8)の3D-TVでは、シーンの奥行きを1つに仮定して、別の視点の映像を作り出している。また、文献9)のディスプレイでは、シーンの奥行きを1つに仮定することなく、FTVの技術を適用してシーンを分析して奥行きを求め、表示する映像を作り出している。

FTVは、実三次元空間情報を伝達・記録する究極の三次元テレビであるとともに、有限視点の画像情報から無限視点の画像情報を作り出す機能をもつ。このようなFTVの機能は、どのような三次元テレビにとっても必要となる。

2. 自由視点テレビの実現法

自由視点システム¹⁰⁾を実現する手法にはさまざまなものがある¹¹⁾。現実世界の自由視点画像を生成する手法は、大きく光線ベースとモデルベースに分けられる。FTVは光線ベースのシステムである。

光線ベースの代表的な手法である光線空間法¹²⁻¹⁵⁾とモデルベース法を比較すると、光線空間法では実写データを利用するため、忠実性や生成画像品質が高い。これに対して、モデルベース法では対象物の形状をモデル化して利用するため、忠実性や生成画像品質は低いが、カメラの視域にない視点でも画像を生成できる。また、光線空間法はどのようなシーンにも適用できるが、モデルベース法は簡単

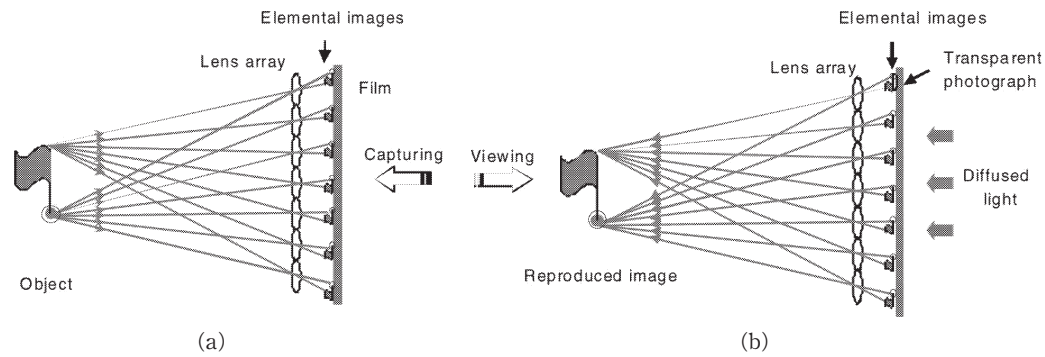


図2 IP方式の原理。(a)撮影,(b)表示。

な形状のものにしか適用できない。このため、テレビやアーカイブなどの用途には、光線空間法に基づく自由視点画像が適している。

自由視点画像を伝達、記録する立場からみると、光線ベースとモデルベースには大きな違いがある。光線ベースでは、信号は撮影された画像信号であるので、ビットレートを上げれば再生信号をいくらでも原信号に近づけることができる。これに対して、モデルベースでは、信号がモデルの形状パラメーターと表面のテクスチャーになるので、モデルの精度以上には原信号を正しく復元することができない。

従来の映像技術に関連づけると、光線ベースは波形符号化、モデルベースはモデルベース符号化にたとえられる。モデルベース符号化は、超低レート伝送が可能な方式として注目されたが、対象を顔画像に限定しても実用化には至らなかった。モデルベースの技術は、通信や記録の方式というよりは、映像の分析や編集のツールとして有効であると考えられる。モデルベースと光線ベースのハイブリッド方式にはさまざまな可能性がある。

光線空間法と同じ光線ベースの手法として、図2に示す原理のIP (integral photography) 方式^{16,17)}がある。IP方式では、物体から発せられる光線情報をレンズアレイを用いて取得・表示する。GRINレンズとハイビジョンを用いて、リアルタイムIPテレビが実現されている。

三次元テレビシステムにはさまざまな入力方式や出力方式があり、信号形式も異なる。異なる三次元テレビ信号の伝達・記録や方式変換を容易にするため、さまざまな三次元テレビシステムに共通なデータフォーマットが望まれる。光線空間法の表現方式はシーンや入・出力方式に依存せず、カメラ画像からの変換も容易であり、信号処理との親和性も高いため、三次元テレビシステムの共通データフォーマットとして最適である。



図3 FTV装置。

3. 自由視点テレビシステム

筆者らは、FTVを光線空間法によって実現した。

送信部では、多くのカメラで撮影した画像を衝立状に配列して光線空間を構築し、FTV信号とする。カメラ配置は、水平方向の自由視点のみを実現する場合には直線配置や円周配置とし、水平方向と垂直方向の両方の自由視点を実現する場合には平面配置や球面配置とする。

FTVでは、衝立状に配列された画像間のデータを補間によって作る。このとき、光線空間の水平断面が直線カメラ配置の場合には直線構造、円周カメラ配置の場合には正弦波構造となることを利用する。光線空間の補間が上手に行えるほど、撮影時のカメラ間隔を広くことができ、少ないカメラ数で撮影できる。

補間は、光線空間全体ではなく必要な部分のみに、送信側または受信側で行うことができる。

受信部では、立体状のFTV信号を垂直に切ったときに断面に現れる画像を表示する。視点を指定すると、切断する位置が定まる。自由視点画像は切断面を変えることで容易に実現できる。

FTVは究極の三次元テレビであるので、その表示には三次元ディスプレイが最適であるが、二次元ディスプレイを用いて、視点に応じた二次元画像を表示してもよい。

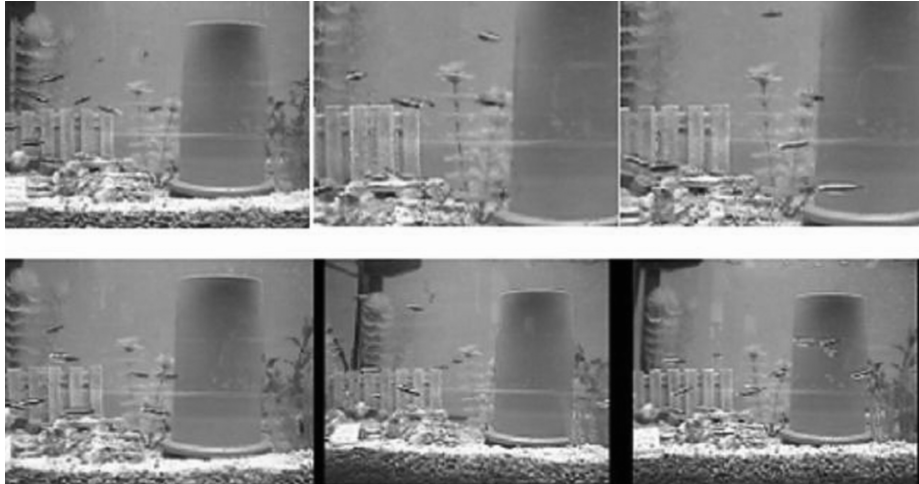


図4 さまざまな時刻と視点で生成した自由視点画像。

FTV 装置と生成した自由視点画像をそれぞれ図3, 図4に示す。これは円弧状に配置した15台のカメラで取得した実写画像をもとにして、水平面内で前後左右に自由に視点を移動させてシーンを見ることができるものである。この装置では、撮像、補間、表示のすべてをリアルタイムで行っている。FTVでは、複雑なシーンを自然に生成できることがわかる¹⁸⁾。

この実験ではPCクラスターを用いて自由視点画像生成を行ったが、PC1台による自由視点画像のリアルタイム生成にも成功している¹⁹⁾。

大規模な三次元空間の自由視点テレビを実現するため、名古屋大学IMI-COEと谷本研究室は100台のカメラからなるFTVの撮影システムを構築した。カメラの配置は、撮影したい空間に応じてさまざまに設定できる。直線配置と円周配置の100眼システムを、それぞれ図5(a), (b)に示す。このシステムを用いて撮影した2つの画像シーケンスRenaとAkko&Kayoが、MPEGテスト画像として採用された。

4. FTVを支える光線取得・表示技術

図6に示すように、これまで画像システムでは画素数を増やす高解像度化が進んできたが、今後は画素数だけでなく視点数の増加が必要となる。

このため、画素数と視点数の積を画素視点積(pixel-view product)と定義し、これを映像システムの性能指標とする。撮影と表示における画素視点積の進歩を図7に示す。筆者らが開発した①100眼システム、②ミラー走査光線取得装置²⁰⁾、③光線再現360度ディスプレイ²¹⁾の画素視点積も図中に記されている。撮影におけるmulti camera (128 views)はスタンフォード大学、multi camera



図5 100眼システム。(a)直線配置,(b)円周配置。

(48 views)はカーネギーメロン大学のものである。

ディスプレイについては、space-multiplexing displayとtime-multiplexing displayの2つのタイプが示されている。space-multiplexing displayの中のintegral photographyはNHKのもの、directional image displayは東京農工大学のものである。space-multiplexing displayの画素視点積は撮像、表示パネルの画素数によって決まるため、ムーアの法則に従って向上している。time-multiplexing displayはこれに時分割による多重効果を加えるので、space-multiplexing displayよりも高い画素視点積が得られる。

撮影、表示いずれについても、画素視点積が急速に向上し、FTVを実用化する技術環境が整いつつあること、名古屋大学のシステムが世界の最高レベルにあることがわかる。

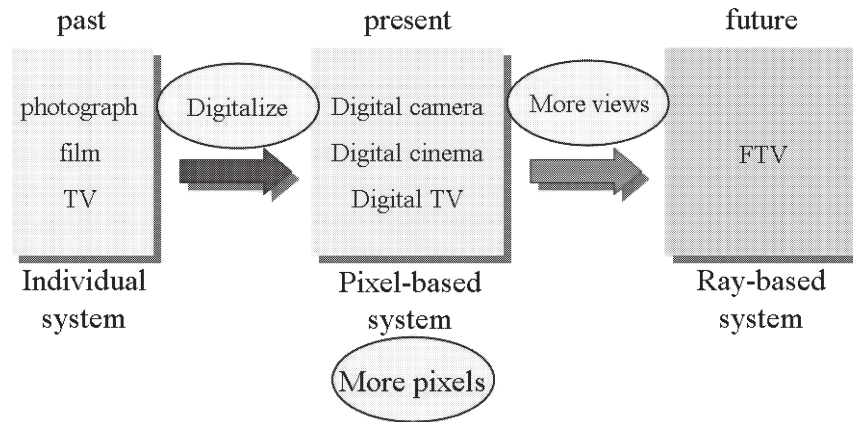


図6 画像システムの進歩。

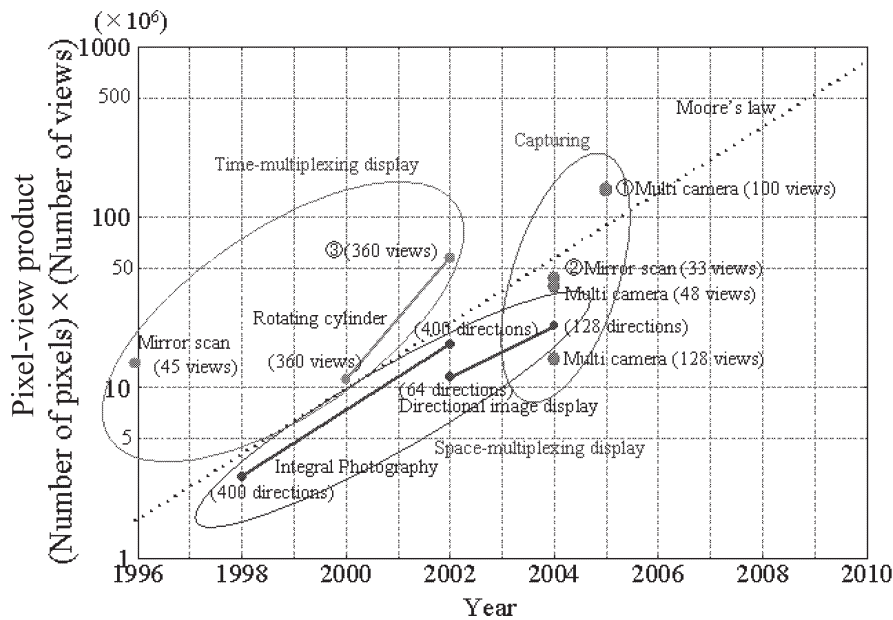


図7 撮像と表示における画素視点積の進歩。

画像工学は、テレビジョンを代表とする現代のさまざまな映像メディアを支える学理である。しかし、FTV や三次元テレビを考えたとき、現在の画像工学はその十分な学理となっていない。なぜなら、現在の画像工学は三次元空間情報をそのままの形では取り扱えず、平面に投影し二次元情報に縮退して、画素として処理しなければならないからである。筆者らは、光線取得・光線情報処理・光線再現ディスプレイの3つの要素からなる光線再現型FTVシステムを構築し、これをプラットフォームとして、三次元空間情報を光線レベルで取り扱うことのできる新しい光線画像工学²²⁾の創成を目指している。

FTV は、ユーザーが視点を自由に選ぶことのできる究極の三次元テレビシステムであり、80年にのぼる長いテ

レビジョンの歴史に、これまでにない大きな変革をもたらす。無限の眼をもつFTVはきわめて高いセンシングや表現の能力をもち、産業や生活、社会、学術、文化の発展に大きな貢献が期待される。

光線を取り扱うFTVは、産業上、学術上の新しいフロンティアである。筆者らは、光線再生型FTVの開発を通して、新しい光線画像工学の創成を目指している。

文 献

- 1) 谷本正幸：“自由視点テレビ”，三次元映像フォーラム，15，No. 3 (2001) 17-22.
- 2) 谷本正幸：“自由視点テレビ”，映像情報メディア学会誌，巻頭，55 (2001.12) 巻頭.
- 3) 谷本正幸：“自由視点テレビFTV”，映像情報メディア学会誌，58 (2004) 898-901.

- 4) M. Tanimoto: "Free Viewpoint Television—FTV," *Picture Coding Symposium 2004, Session 5* (December 2004).
- 5) M. Tanimoto: "FTV (Free Viewpoint Television) creating ray-based image engineering," *Proc. of ICIP 2005* (September 2005) pp. II-25-II-28.
- 6) M. Sekitoh, T. Fujii, T. Kimoto and M. Tanimoto: "Bird's eye view system for ITS," *IEEE, Intelligent Vehicle Symposium* (May 2001) pp. 119-123.
- 7) 関藤 誠, 沓名輝幸, 豊田興一, 藤井俊彰, 木本伊彦, 谷本正幸: "自由視点リアルタイム鳥瞰図生成システム", 3次元画像コンファレンス2001 (2001.7) pp. 41-44.
- 8) W. Matusik and H. Pfister: "3D-TV: A scalable system for real-time acquisition, transmission and autostereoscopic display of dynamic scenes," *ACM SIGGRAPH* (August 2004) pp. 814-824.
- 9) T. Saishu, S. Numazaki, K. Taira, R. Fukushima, A. Morishita and Y. Hirayama: "Flatbed-type autostereoscopic display system and its image format," *Proc. SPIE 6055* (2006) 261-268.
- 10) M. Tanimoto: "Chapter 4. Free viewpoint systems," *3D Videocommunication* (Wiley, 2005) pp. 55-73.
- 11) A. Smolic and P. Kauff: "Interactive 3-D video representation and coding technologies," *Proc. IEEE*, **93**, No. 1 (2005) 98-110.
- 12) 藤井俊彰: "3次元統合画像符号化の基礎検討", 東京大学大学院工学系研究科博士論文 (1994).
- 13) T. Fujii, T. Kimoto and M. Tanimoto: "Ray space coding for 3D visual communication," *Picture Coding Symposium '96* (March 1996) pp. 447-451.
- 14) M. Tanimoto, A. Nakanishi, T. Fujii and T. Kimoto: "The hierarchical ray-space for scalable 3-D image coding," *Picture Coding Symposium 2001* (April 2001) pp. 81-84.
- 15) T. Fujii and M. Tanimoto: "Free-viewpoint TV system based on ray-space representation," *SPIE ITCom*, **4864-22** (2002) 175-189.
- 16) J. Arai, F. Okano, H. Hoshino and I. Yuyama: "Gradient-index lens array method based on real-time integral photography for three-dimensional images," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 2034-2045.
- 17) F. Okano, J. Arai, H. Hoshino and I. Yuyama: "Three-dimensional video system based on integral photography," *Opt. Eng.*, **38** (1999) 1072-1077.
- 18) P. Na Bangchang, M. Panahpour Tehrani, T. Fujii and M. Tanimoto: "Realtime system of Free Viewpoint Television," *J. Inst. Image Inf. TV Eng. (ITE)*, **59**, No. 8 (2005) 1191-1198.
- 19) 福嶋慶繁, 圓道知博, 藤井俊彰, 谷本正幸: "光線に基づく実時間自由視点画像生成システム", 3次元画像コンファレンス2005 (2005.7) pp. 25-28.
- 20) T. Fujii and M. Tanimoto: "Real-time ray-space acquisition system," *SPIE Electron. Imaging*, **5291** (2004) 179-187.
- 21) T. Endo, Y. Kajiki, T. Honda and M. Sato: "Cylindrical 3-D video display observable from all directions," *Proceedings of Pacific Graphics 2000* (2000) pp. 300-306.
- 22) 谷本正幸: "光線画像工学—3次元画像メディアの新しいフレームワーク—", 映像情報メディア学会メディア工学シンポジウム (2005.3) pp. 13-19.

(2006年6月21日受理)