

特別寄稿 もし100個の目があれば —自由視点テレビによる空間情報センシング—*

If We Had 100 Eyes – Space Information Sensing Using Free Viewpoint TV –

谷本正幸

Masayuki TANIMOTO

1. はじめに

視覚は人の持つ最も重要なセンサである。私たちは自分の目で周りを見ることによって状況を理解し、確認し、それをもとに行動する。目を閉じて周りを見えないようにしてみれば、目が果たしている機能の大きさが分かる。目が二つでもこれだけのことができるなら、もし100個の目があればどんなことができるだろうか。100眼力のすばらしい視覚センサとなり、人に大きな力を与えてくれるに違いない。もちろん100個の目を持つ人間など実際にいるわけではないが、技術の力を借りればその実現も夢ではない。

人の目は自分の周りの見渡せる範囲のものしか見ることができない。遠く離れた地で起こっていることは見ることができない。また、近くにあっても極めて小さなものは見ることができない。しかし、望遠鏡や顕微鏡を用いればレンズの力で遠くのものや極微のものを見ることができ、テレビジョンを用いれば人の目の能力は更に拡大される。遠隔地の情景を居ながらにして見ることは人類の長い間の夢であった。テレビを利用すれば、地球の裏側の情景も居ながらにして見ることができ、テレビジョンは遠隔地の情景を見たいというこの人類の夢を実現したものである。

しかし、テレビという人工の目は、地球の裏側の情景をも居ながらにして見るという、人の目では到底できないことを可能にただけではない。人々の生活を豊かにする様々な応用分野をもたらした。すなわち、現在テレビは遠隔地の情景を伝えるだけでなく、報道、スポーツ、映画、エンターテインメント、芸術、教育など、当初には考えられなかった数多くの分野で利用されている。

テレビは1926年の高柳健次郎博士による世界初の電子式受像実験の成功以来、1953年の商用放送開始、1960年のカラー化、2003年の地上デジタル放送などを経て、現在に至っている。こ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、様々な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。これは現実の世界で体験していることとは全く異なるものである。

これはテレビが一つの目しか持たないためである。もしテレビが100個の目を持てばどうだろうか。これが自由視点テレビである。自由視点テレビは実は100個の目というより無限個の目を持つものである。

自由視点テレビ (Free Viewpoint TV, FTV)¹⁾⁻³⁾は、私たちがあたかもその場にいるかのように、自由に視点を変えて3次元シーンを見ることのできる究極のテレビである。視点を変えるためには、多くの視点から見た画像が必要である。多視点のシステムとして、2眼式や多眼式の3次元テレビがあるが、その視点数は高々10程度である。これに対して、FTVでは視点をどこにでも置くことができる。すなわちFTVの視点数は無限大とみなすことができる。このため、FTVは2眼式や多眼式の3次元テレビを遙かに凌ぐ究極の3次元テレビであるといえる。更に、視点の自由な移動を可能とするFTVは、高度な表現力を有する次世代テレビ、高いセキュリティを実現する社会インフラとしても位置付けられる。

名古屋大学谷本研究室はFTVを構築するための技術開発を進め、2000年にそのリアルタイム実験に世界で初めて成功した⁴⁾。これらの結果をもとに、電子情報技術産業協会JEITAの支援を受け、FTVを映像の国際標準化機関であるMPEGに提案した。2年にわたる活動の結果、FTVはMPEG 3 DAV (3-Dimensional Audio Visual) の最も挑戦的な課題として認められ、自由視点映像 (Free Viewpoint Video) の圧縮符号化方式の標準化に向けて、評価実験を開始することとなった。

本稿ではFTVを構成する仕組み、FTVシステム、FTVの意義、国際標準化活動などについて紹介する。

* 2004年8月13日 原稿受理

2. FTVを実現する光線空間法⁵⁾⁶⁾

ある点を通る光線を平面に投影すると、その視点から見た画像となる。すなわち、ある点を様々な方向に通る光線群を集めると、その点を視点とする画像が得られる。そこで、3次元空間のあらゆる点ごとに、その点を通る光線情報を取得すれば、FTVが実現できることになる。それには、見たい3次元空間内にびっしりと連続的にカメラを配置すればよいが、それは困難である。

このため、以下の二つの性質を利用する。

- (1) 光線は直進する。
- (2) 物体上の同一点を異なる方向から見ても同じ色に見える。すなわち、物体上の点から異なる方向に進む光線は等しい値を持つ。

(1)より、Fig. 1に示すようにある点を通る光線は、その進行方向上にある別の点の光線情報として取得することができる。また進行方向上にカメラがなければ、(2)を利用して光線情報を近くの光線情報から補間によって作り出すことができる。これらのことから、カメラを空間内に連続的に配置するのではなく、面上や線上に離散的に配置し、有限視点のカメラ画像から無限視点のカメラ画像を作り出すことができる。これによってFTVを現実的な手法で構成できることとなる。この手法が光線空間法である。

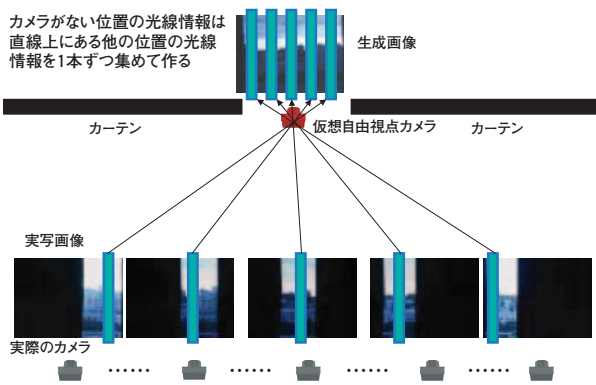


Fig. 1 自由視点画像の作り方

光線空間法では、3次元実空間の1本の光線を、それを表すパラメータを座標とする多次元空間の1点で表す。この仮想的な空間を光線空間という。光線空間全体は3次元実空間のすべての光線を過不足なく表現する。光線空間は、多くの視点から撮影した画像を集めることによって作られる。光線空間の点の値は画像の画素値と同じであるから、画像から光線空間への変

換は単なる座標変換である。

光線空間の作り方をFig. 2に示す。ここでは分かりやすくするため、垂直方向の視差を無視する場合について説明する。Fig. 2は多くのカメラを鉄砲隊のように一直線上に配置する場合である。多数のカメラで撮影した画像を多視点画像という。撮影した多視点画像を順に衝立状に配列するとカルタを重ねたような立体ができる。これが光線空間となる。

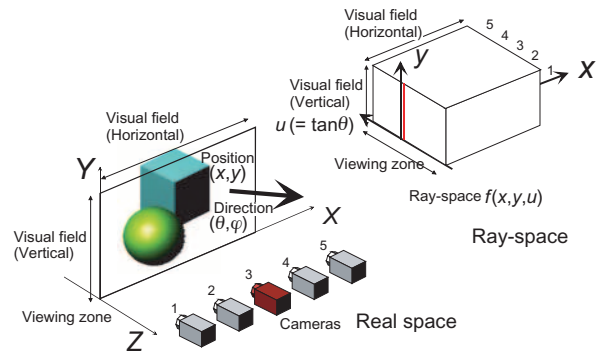


Fig. 2 光線空間の作り方

カメラ間隔が広いと衝立の間隔が広がり、光線空間が疎になる。このような場合には、光線空間を補間して密な光線空間を得る。カメラを直線上に配列した場合の光線空間を直交座標光線空間という。直交座標光線空間の例をFig. 3に示す。垂直断面は2次元画像であるが、水平断面は前記(2)の性質より直線構造となる。この直線構造を検出して光線空間の補間に利用する。

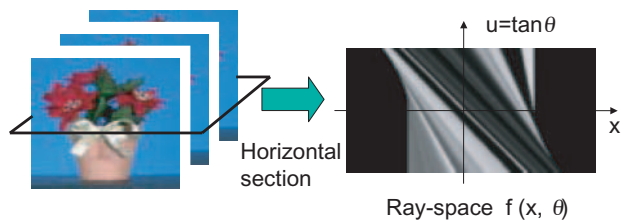


Fig. 3 直交座標光線空間の例

光線空間から自由視点画像を生成する方法をFig. 4に示す。ある視点から見た画像はその視点に対応した位置で光線空間を垂直に切ったときの断面として得られる。これがFig. 1に示した各カメラ画像から光線を1本ずつ集めてくるプロセスを実行していることになる。

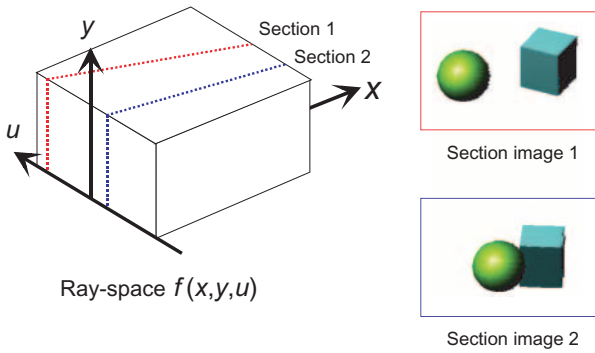


Fig. 4 自由視点画像の生成法

3次元空間を取り囲むように見たい場合には、カメラを円周上に配置し、極座標系の光線空間とする。極座標光線空間の水平断面は前記(2)の性質より、Fig. 5に示すような正弦波構造となる。

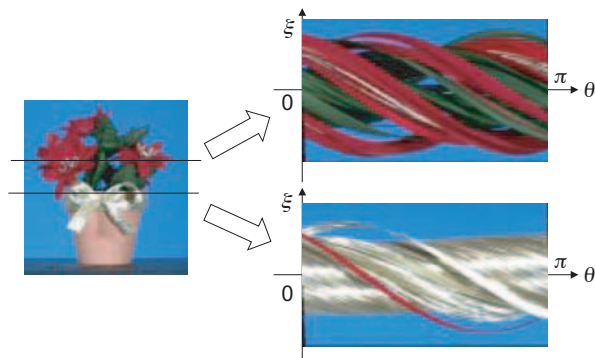


Fig. 5 極座標光線空間の例

光線空間法と同様に光線を再現する3次元画像システムとしてIP(Integral Photography)と呼ばれるシステムがある。IPは光線空間と同じ情報を物理的に獲得するものである。このことから、頭の中で考えた光線空間が、実は普遍性の高い仕組みであることが分かる。

3次元画像システムには様々な入力方式や出力方式があり、信号形式も異なる。異なる3次元画像信号の伝達・記録や方式変換を容易にするため、様々な3次元画像システムに共通なデータフォーマットが望まれる。代表的な3次元画像表現方式の比較⁷⁾をTable 1に示す。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るため、3次元画像システムの共通データフォーマットとして最適である。

Table 1 3次元画像表現方式の比較

| Representation | Data acquisition | 3D-model | Data conversion | Free view generation |
|---------------------|-----------------------------------|----------|--|---|
| Image domain | Direct acquisition | No | No | Warping/projection |
| Ray-space | Camera calibration & registration | No | Coordinate transform (Camera coordinate to world coordinate) | Memory access |
| Surface light field | | Required | Coordinate trans. + decomposition & approximation | Texture map / pixel-by-pixel multiplication |
| Model-based | | Required | Coordinate transform | Projection/rendering |

3. FTVシステム

FTVシステムの構成をFig. 6に示す。FTVでは撮影、補間、圧縮、表示の処理を行う。

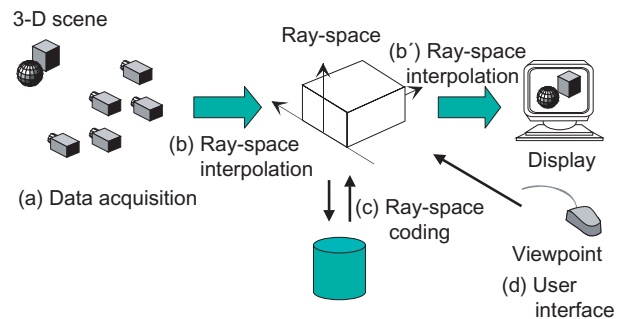


Fig. 6 FTVシステム

送信部では、多くのカメラで実空間を撮影する。多数のカメラで撮影した画像を衝立状に配列し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前述の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。

光線空間に衝立状に配列された画像の間にはデータがないため、これを補間によって作る。⁸⁾⁹⁾このとき、前に述べたように、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することができ、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行えばよい。補間を行う場所は、VODのような用途では送信側、放送のような用途では受信側となる。

FTV信号は従来のテレビ信号に比べてカメラの台数

分だけ情報量が多くなるので、情報圧縮の必要性が高い。FTV信号は、従来のテレビ信号の持つ隣接画素間、およびフレーム間の相関に加えて、視点間の相関が高い。現在のMPEG圧縮方式では視点間の相関を利用していないため、新しい圧縮方式¹⁰⁾が必要であり、これがMPEGの新しい課題となっている。

受信部では、Fig. 3に示すように立体状の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。自由視点映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3次元テレビであるが、その表示には3次元ディスプレイでなく、2次元ディスプレイを用いて、視点に応じた2次元画像を表示してもよい。¹¹⁾ 3次元ディスプレイを用いれば、ユーザは運動視差と立体視差を認識でき、自由視点テレビの持つ3次元情報を有効に利用できる。

FTVのリアルタイム装置¹²⁾を構築した。カメラ配置は直線、平面、球面、円弧状などを試みた。FTV装置の例をFig. 7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出来るものである。撮像、補間、表示は行っているが、圧縮は行っていない。FTVで生成した自由視点画像例をFig. 8に示す。複雑なシーンを自然に生成できていることが分かる。

現在、更に大きな3次元空間を100台のカメラで撮影するFTVを構築中である。



Fig. 7 FTV装置



Fig. 8 FTVによって生成した自由視点画像

4. FTVの意義

FTVは学術上、産業上、大きな意義を持つ。学術上では、FTVは信号処理の新しいフロンティアとなる。

従来のテレビ信号は2次元画像が時間方向に配列されたものである。これに対して、FTV信号はFig. 2に示したように2次元画像が空間方向に配列されたものである。このことからFTV信号は従来のテレビ信号の自然な拡張となっていることが分かる。静止画からテレビになったときにフレーム間処理という新しい信号処理が生まれたように、テレビからFTVになれば視点間処理が信号処理の新たな課題となる。

産業上からはFTVは以下のように位置付けられ、次世代映像メディアとして大きな意義を持つ。

- (1) 全空間情報を伝達・記録する究極の3次元テレビ
距離と時間を克服する究極の高臨場感通信が実現できる。また、撮影・記録したシーンの完全な分析が可能となる。FTVは撮像、表示、伝送、蓄積、圧縮、処理などの機器やシステムに現在よりも高い能力を要求する。このためこれらの機器やシステムを高度化し、IT産業の発展を牽引する。
- (2) 高い表現力を有する次世代テレビ
空間情報のすべてを有する上、表示には大きな自由度があるため、放送、通信、芸術、エンターテインメント、教育、セキュリティ等の分野で新たなアプリケーションを創造する。
- (3) 社会の安全性を高める情報インフラ

FTVをセンサーネットワークに拡張すれば、社会の安全性を高める情報インフラとなり、公共施設、道路、交通機関、学校、工場などへの新たな投資を生む。

FTVは、放送、通信、ITなどの分野で現在のテレビに代わって用いられるものであるが、その特徴を生かした以下のような幅広い用途がある。

- エンターテインメント：ゲーム、スポーツ、イベント、博覧会など
- 自然観察：バードウォッチング、サファリパーク、海中公園など
- 観光：バリアフリー観光
- 美術館・博物館：新しい展示法、鑑賞法
- 芸術：新しいメディアアートの創造
- 映像制作：現実にはあり得ない
カメラモーションも可能
- アーカイブ：無形文化財、伝統芸能の保存
- 教育：遠隔教育、教材
- 医療：診断、手術、教育
- セキュリティ・監視：公共施設、原子力施設など
- 交通：交差点などでの交通監視、ITS

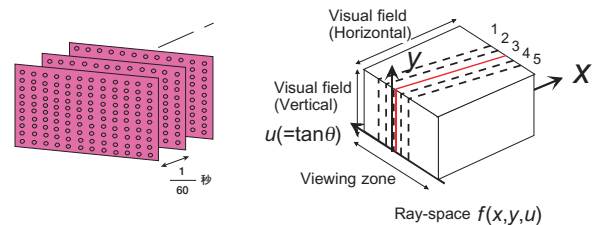
FTVの撮像にはたくさんのカメラが必要であるが、対象物の形状が分かっている場合には、1台のカメラ画像から自由視点映像を作ることできる。自動車の安全走行支援のため、運転者の死角になる場所をカメラで撮り、その画像を運転者の視点に変換して提示した例¹³⁾をFig. 9に示す。これは交差点での右折時に、対向右折車の後方から来る直進車を対向右折車の後部カメラで撮影し、この映像を運転者の視点に射影変換し、対向右折車の映像に重畳して表示したものである。前方左座席の前の部分に、実際には見えない直進車が示されていることが分かる。



Fig. 9 視点変換画像を重畳した運転支援画像

5. 国際標準化に向けて

FTVは動画像の国際標準化会議であるMPEGの3DAV (3D Audio Visual) アドホックグループに提案され、高い評価を得ている。私たちはFig. 10(a), (b)に示すように、FTVのデータフォーマットと圧縮方式の標準化を目指している。



現在のテレビのフォーマット 自由視点テレビのフォーマット

Fig. 10 (a) 標準化の目標 1

—自由視点テレビのフォーマットの標準化—

現在のMPEG：時間方向に圧縮符号化
FTVの圧縮：時間と位置の両方向に圧縮符号化

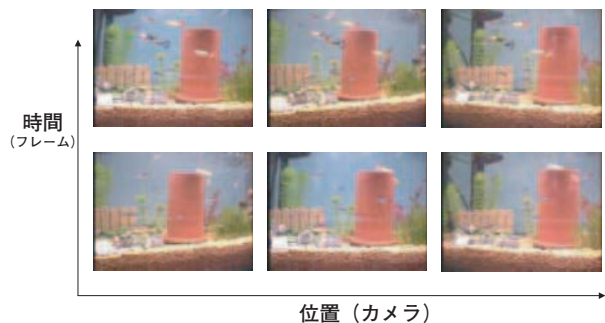


Fig. 10 (b) 標準化の目標 2

—自由視点テレビ符号化方式の標準化—

これまでの成果を以下に示す。

- (1) 「自由視点 Free Viewpoint」の構想がMPEG 3DAVグループの中心テーマとして認められた。
- (2) FTVの構築法として光線空間法が有力な候補であることを示した。
- (3) “Call for Comments on 3DAV” に応えて、多くの企業からFTVへの支持を得た。
- (4) 多視点映像 (FTV信号) の圧縮実験が開始された。

MPEG 3DAV アドホックグループでは以下の4項目について調査実験 (Exploration Experiment, EE) を行ってきた。

- EE 1：全方位映像
- EE 2：自由視点映像

EE3：立体映像

EE4：奥行き情報を持つ3次元TV

EE2は私たちがFTVを提案したことによって作られた項目であり、最も挑戦的な課題と位置付けられた。

2003年10月のトロンハイム会合で幅広く3DAVに関する産業界の意見を聞くことを決定し、“Call for Comments on 3DAV”を発表した。寄せられた意見を2004年3月のミュンヘン会合で集計した結果、FTVと光線空間信号フォーマットを支持する意見が大勢を占めた。この結果を受けて、MPEGは自由視点映像の実現を目指して多視点映像の圧縮実験を開始することとなった。2005年1月の会合にてその評価を行う予定である。ここで良い結果が得られれば、FTVは“Call for Proposal”の段階に進むことになる。

6. むすび

自由視点テレビは、視聴者が視点を自由に選ぶことのできる全く新しいテレビシステムであり、映像情報のプラットフォームであるテレビジョンの世界に大きな変革をもたらすものである。無限個の目を持つFTVは産業上の利用だけでなく、人のセンシングや表現の能力を拡大させ、生活や文化を安全で豊かなものにすることに貢献できるであろう。

FTVは遠い将来のものではなく、現在の技術で実現できるものであるが、より大規模かつ高品質に実現するには、機器やシステムの性能に一層の向上が必要である。また、FTVは学術上、産業上の新しいフロンティアであり、解決すべき多くの課題がある。このフロンティアに多くの方が挑戦し、FTVの実用化が早急に達成されることを切望する。

<参考文献>

- 1) 谷本正幸：“自由視点テレビ”，三次元映像フォーラム，Vol. 15, No.3, pp. 17-22 (2001).
- 2) M. Tanimoto and T. Fujii, "FTV—Free Viewpoint Television", ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 M8595, July 2002.
- 3) Toshiaki Fujii, Masayuki Tanimoto, "Free-Viewpoint TV System Based on Ray-Space Representation", SPIE ITCOM Vol. 4864-22, pp.175-189, Aug. 2002.
- 4) 関藤誠，沓名輝幸，豊田興一，楊世洪，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，pp.41-44 (2001).
- 5) 藤井：“3次元統合画像符号化の基礎検討”，東京大学工学系研究科博士論文 (1994).
- 6) T.Fujii, T.Kimoto, M.Tanimoto, "Ray Space Coding for 3D Visual Communication", Picture Coding Symposium '96, pp. 447-451, Mar. 1996.
- 7) M. Tanimoto and T. Fujii, "Comparative Evaluation of Ray-Space Representation", ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 M8892, Oct. 2002.
- 8) T.Kobayashi, T.Fujii, T.Kimoto, M.Tanimoto, "Interpolation of Ray-Space Data by Adaptive Filtering", SPIE Electronic Imaging 2000, Vol. 3958, pp. 252-259, Jan. 2000.
- 9) 中西敦士，藤井俊彰，木本伊彦，谷本正幸：“EPI上の対応点軌跡を用いた適応フィルタによる光線空間データ補間”，映像情報メディア学会誌，Vol. 56, No. 8, pp.1321-1327 (2002).
- 10) M. Tanimoto and T. Fujii, "Ray-Space Coding Using Temporal and Spatial Prediction", ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 M10178, Oct. 2003.
- 11) 東 尊弘，藤井 俊彰，谷本 正幸：“自由視点テレビのユーザーインターフェイス”，映像メディア処理シンポジウム (IMPS) 2003, pp.19-20 (2003).
- 12) P. Na Bangchang, T. Fujii, M. Tanimoto, "Experimental System of Free Viewpoint Television", Proc. of SPIE Electronic Imaging, Vol. 5006-66, Jan. 2003.
- 13) 小山石正人，酒井裕史，藤井俊彰，谷本正幸：“HIR (Human-Oriented Information Restructuring) システムによる交差点右折時の運転支援”，第10回画像センシングシンポジウム講演論文集，pp.1-6 (2004).



<著 者>



谷本 正幸

(たにもと まさゆき)

名古屋大学大学院工学研究科
電子情報システム専攻 教授

1970年東京大学工学部電気工学科卒業。1976年東京大学大学院工学系研究科電子工学専門課程博士課程修了。工学博士。1974年ドイツ連邦共和国アーヘン工科大学半導体工学研究所留学。1976年名古屋大学工学部助手。1991年同教授。通信方式、画像情報圧縮、画像処理の研究に従事。

新技術開発財団市村賞貢献賞，電気通信普及財団賞，

テレビジョン学会丹羽高柳賞論文賞，IEEE Intelligent Vehicles Symposium Best Interactive Papers Award，3次元画像コンファレンス優秀論文賞など受賞。

映像情報メディア学会副会長，電子情報通信学会評議員，通信方式研究専門委員会委員長，画像符号化シンポジウム運営委員会委員長など歴任。画像情報の圧縮と処理への貢献により電子情報通信学会フェロー。