

知っておきたいキーワード

4:4:4と4:2:0

(正会員) 山岸 秀一†

†三菱電機株式会社 情報技術総合研究所

"4:4:4 and 4:2:0" by Shuichi Yamagishi (Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation, Kamakura)

キーワード: カラー画像, フォーマット, 視覚特性, 輝度, 色差, サブサンプリング

4:4:4, 4:2:0とは?

デジタル画像は、水平・垂直方向に並んだ画素(ピクセル)と呼ばれる単位の集まりで表現されます(図1(a)). そしてデジタルカラー画像は、このデジタル画像3枚の組で表すことができます. この3枚の画像の組合せには、赤(R)、緑(G)、青(B)をはじめさまざまなものがありますが、特に、輝度(Y)と色差(UとV)の組合せを用いる場合には、人間の視覚特性を利用してUとVの解像度を落とすことができます. 解像度を落とさない画像のことを4:4:4、色差U、Vについて水平・垂直方向の解像度をそれぞれ半分に落としたものを4:2:0と呼びます(図1(b), 図1(c)). この4:4:4や4:2:0といったフォーマットのデジタル画像を作成するための色の変換やサブサンプリングについて説明いたします.

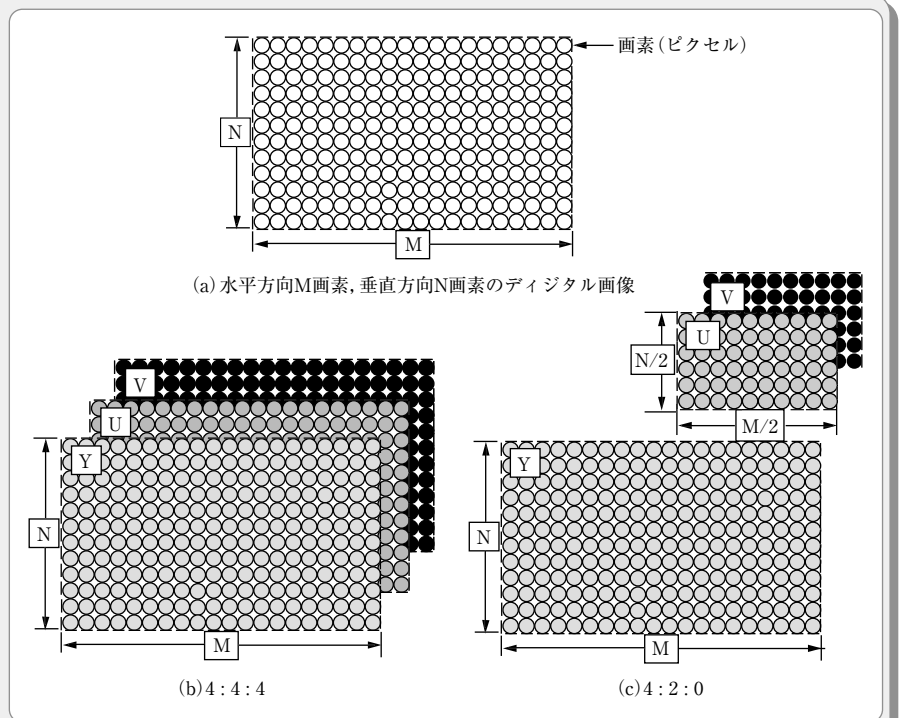


図1 デジタルカラー画像

色の変換

デジタルカラー画像は、一般には撮像系からR、G、B3枚のデジタル画像として取り込まれます。このデジタルカラー画像をハードディスクに記録したり、また通信回線を使って伝送する場合、蓄積容量や伝送効率を考へて、通常は画像圧縮手法を用いてデジタル画像の符号化を行います。この時、RGB色空間の画像信号をそのまま符号化することはせず、圧縮効率を高めるために、人間の視覚特性を考慮した変換手法によって別の色空間の信号に変換し、信号の間引きを行い、それから符号化するのが一般的です。ここで、通常行われる色信号の変換は、明るさ(Y)と色合い(U、V)の組合せへの変換です。Yは輝度と呼ばれます。また、Uには赤色と輝度の差(R-Y)、Vには青色と輝度の差(B-Y)が用いられ、ともに色差と呼ばれます。図2にRGBからYUVへの色空間変換に用いられる変換式を示します。また、その具体例として、ITU-R BT.709と呼ばれる高精細テレビジョン方式のスタジオ規格による変換式と、ITU-R BT.601と呼ばれる標準テレビジョン放送用の画像への変換式を合わせて示しました。図3には、ITU-R BT.709方式によりHDTVサイズ(水平方向1,920画素×垂直方向1,080画素)のRGB画像を、YUV(ITU-R BT.709方式ではYPbPrと呼ばれます)画像に変換した時の変換画像の例を示します。なお、圧縮符号化されたデータを画像として再び表示するには、まず符号化に用いられた画像圧縮方式に従う復号化を行った後、色差信号にアップサンプル処理を適用して間引きのないYUV信号を復号します。そして、YUVからRGBへの色空間変換(RGBからYUVへの変換の逆変換になります)を行い、RGB画像を復元し表示します。YUVからRGBへの色空間の逆変換式は図2を参照して下さい。

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_R R + (1 - k_R - k_B) G + k_B B \\ \frac{0.5}{1 - k_B} (B - Y) \\ \frac{0.5}{1 - k_R} (R - Y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_R & 1 - k_R - k_B & k_B \\ -0.5 k_R & \frac{-0.5(1 - k_R - k_B)}{1 - k_B} & 0.5 \\ 0.5 & \frac{-0.5(1 - k_R - k_B)}{1 - k_R} & \frac{-0.5 k_B}{1 - k_R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y + \frac{1 - k_R}{0.5} V \\ Y - \frac{2 k_B (1 - k_B)}{1 - k_R - k_B} U - \frac{2 k_R (1 - k_R)}{1 - k_R - k_B} V \\ Y + \frac{1 - k_B}{0.5} U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2(1 - k_R) \\ 1 & -\frac{2 k_B (1 - k_B)}{1 - k_R - k_B} & -\frac{2 k_R (1 - k_R)}{1 - k_R - k_B} \\ 1 & 2(1 - k_B) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix}$$

(a) 変換・逆変換式

$$\begin{pmatrix} Y \\ Pb \\ Pr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ -0.1146 & -0.3854 & 0.5 \\ 0.5 & -0.4542 & -0.0458 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.5 \\ 0.5 & -0.419 & -0.081 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1.5748 \\ 1 & -0.1873 & -0.4681 \\ 1 & 1.8556 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ Pb \\ Pr \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1.402 \\ 1 & -0.344 & -0.714 \\ 1 & 1.772 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{pmatrix}$$

$(k_R, k_B) = (0.2126, 0.0722)$

YUVをYPbPrと表します。

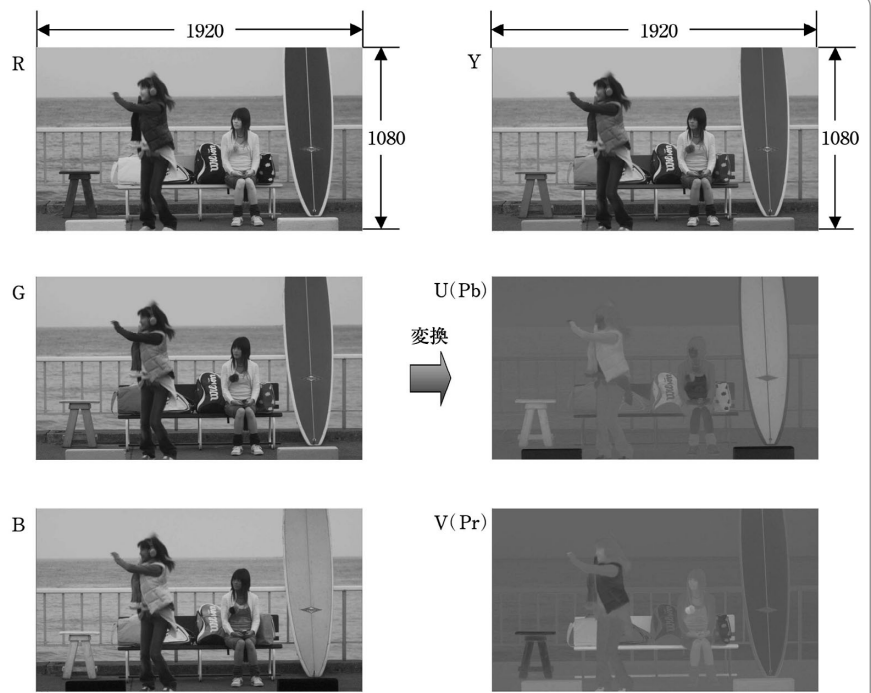
(b) ITU-R BT.709方式

$(k_R, k_B) = (0.299, 0.114)$

YUVをYCbCrと表します。

(c) ITU-R BT.601方式

図2 RGBとYUV間の変換・逆変換式



デジタル画質評価映像 “CoSME” *より

* (財) デジタルコンテンツ協会 “Color Space Management Evaluation Material (CoSME)”, <http://www.dcaj.org/cosme/>

図3 ITU-R BT.709方式によるRGBからYUV (YPbPr) への色空間変換

サブサンプリング

人間の視覚特性には、例えば暗闇では物の形は認識できても色については認識しにくいといったように、輝度に対する感度に比べて色に対する感度が低いという性質があります。RGB画像をYUV画像に変換することで、このような人間の視覚特性を上手に利用することができるようになります。図3をもう一度見ていただくと、RGB画像では、それぞれが同程度の鮮明さで知覚されるのに対し、YUV (YPbPr) 画像では、輝度Yに比べて色差U (Pb) やV (Pr) は画素値の変化が小さく不鮮明に知覚されるのがわかると思いますが、そこで、この視覚特性を利用して、

RGBからYUVに色空間変換した画像を、Yはそのままにして、UとVについては間引き(サブサンプリングといいます)を行うことによって情報量を減らすことが行われます。UとVについて、それぞれ水平方向を半分の間引いたものを4:2:2フォーマットと呼びます。また、UとVそれぞれの水平・垂直両方向を半分の間引いたものを4:2:0フォーマットと呼びます。そして、サブサンプリングをまったく行わない画像を4:4:4フォーマットと呼びます(4:2:0と4:4:4については先に述べたとおりです)。これらの数字は、元々アナログ映像信号のサンプリング周波数の比率を表すものですが、ここでは水平方向のY、U、Vそれぞれの

成分の画素数を表すものと理解してください。すなわち、4:4:4は四つのY画素に対して同じ数のUとVの画素があることを示します。また、4:2:2は四つのY画素に対してUとVの画素がそれぞれ二つずつあることを表します。ただ、4:2:0については、4:4:4と4:2:2から区別する記号として慣例的に用いられています。図4に、4:4:4、4:2:2、4:2:0それぞれのフォーマットの例を示します。4:4:4は主にコンテンツ制作素材など業務用途に用いられます。また、4:2:2は主に放送用の素材に用いられます。そして、4:2:0はデジタルテレビやDVDといった民生用途のアプリケーションに広く使われています。

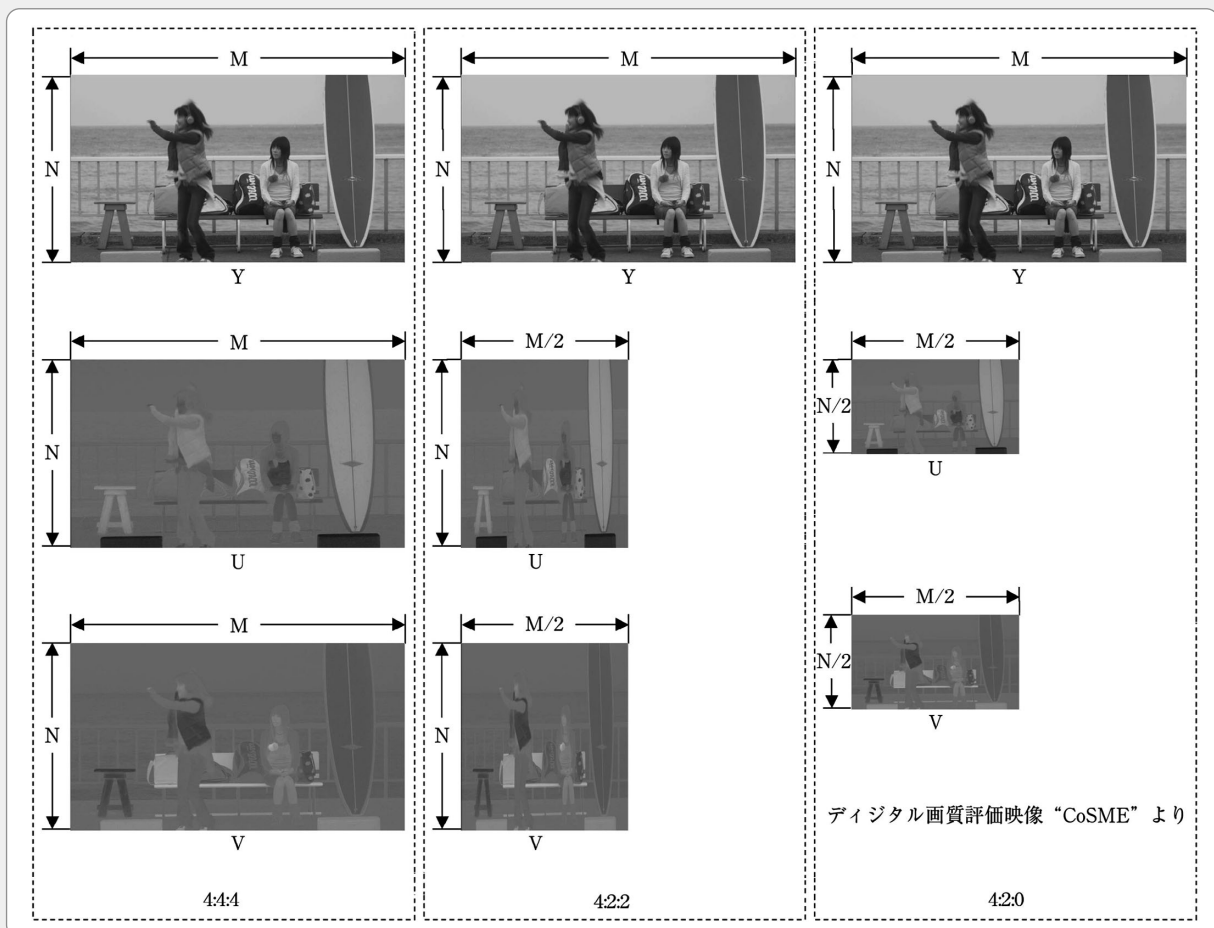


図4 4:4:4, 4:2:2, 4:2:0フォーマット

4:2:2や4:2:0のサンプリング位置

4:2:2や4:2:0の画像は4:4:4画像の色差成分(U, V)をサブサンプリングして作ることができますが, 単にUやVの画素を一つおきに取り去るだけでは, エイリアシングと呼ばれる画質劣化が発生します. そこで, 通常はエイリアシングの発生を抑えるローパスフィルタ処理を施してサブサンプリングを行います. ただし, サブサンプリングを行う場合, 用いるフィルタの種類によって, 生成されるサブサンプル点(標本点)の位置が異なってくるので注意が必要です. 例えば図5に示すように, 偶数個の係数を持つフィルタの標本点の位置は, サブサンプリング前の画素位置の中間点に, また, 奇数個の係数を持つフィルタの標本点の位置は, サブサンプリング前の画素位置と同じ点になります. ところで, 画像には, 順次走査(プログレッシブ走査とも呼ばれます)により構成されるものと, 飛び越し走査(インタレース走査とも呼ばれます)により構成されるものがあります. 走査とは画像を水平方向の線(走査線といいます)に沿ってスキャンすることを言いますが, テレビジョン放送などで2次元の画像を1次元信号に変換して送る時に用いられます. 順次走査は, この走査を画像の上から下に順に行うもので, コンピュータのディスプレイに用いられている構成です. 一方, 飛び越し走査は, 走査を1走査線おきに上から下に行い, 残った走査線を再び上から下に走査するもので, ブラウン管方式に用いられている構成です. ここで, 一番上の走査線を含む走査線群をトップフィールド, 一番下の走査線を含む走査線群をボトムフィールドと呼びます. また, トップフィールドとボトムフィールドを合わせてフレームと呼びます. MPEG-2やMPEG-4 AVC/H.264といった動画画像圧縮の国際標準規格では, 順次走査や飛び越し走査について, それぞれ4:2:2や4:2:0フォーマットでのY, U, Vの画素位置が決められています(図6).

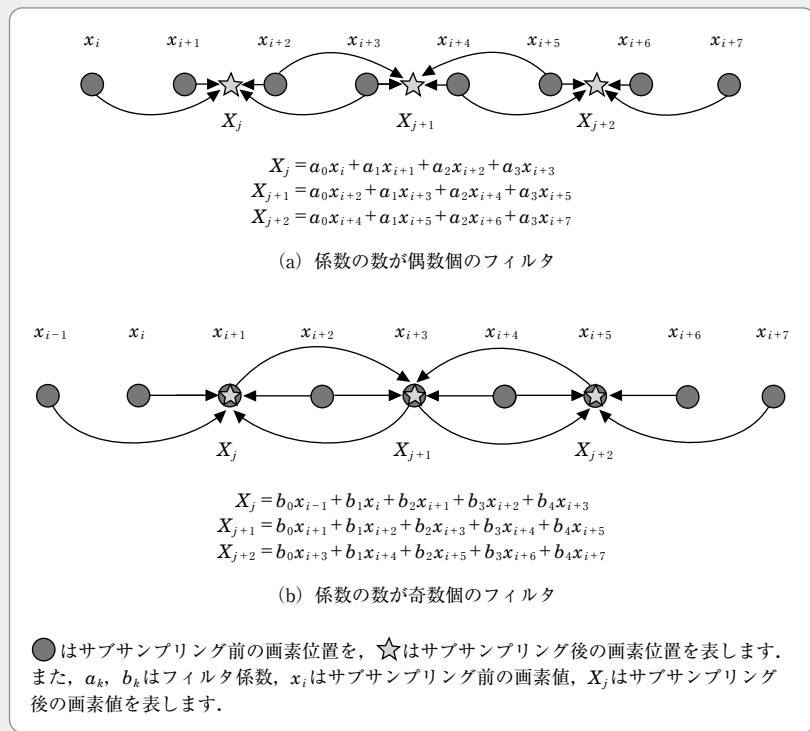


図5 サブサンプリング

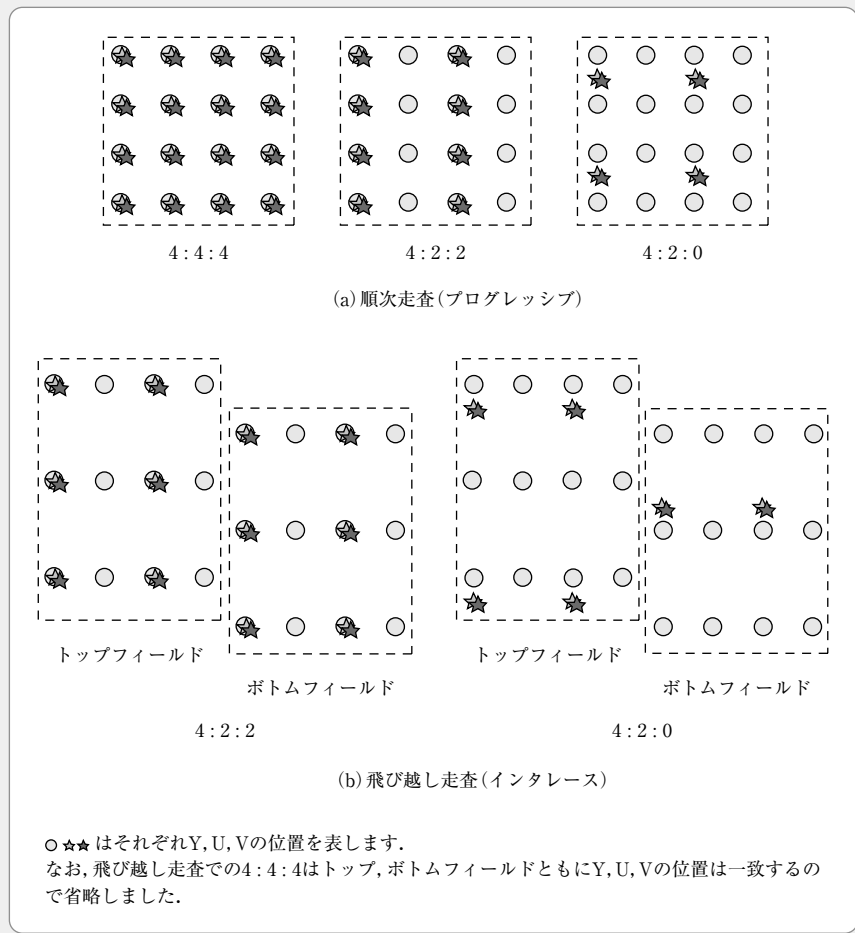


図6 国際標準規格 (MPEG-2, MPEG-4 AVC/H.264) でのY, U, Vの位置

4:2:0, 4:2:2から4:4:4へ

RGBからYUVへの色空間変換は、昭和35年(1960年)に開始されたカラーテレビ放送に際して、白黒テレビとの両立性を確保するために行われるようになりました。三つの色信号を白黒テレビと同じ一つの伝送帯域内に収めるために、輝度信号(Y)を従来の白黒テレビの信号として使い、二つの色差信号(U, V)については視覚特性を利用して帯域を約半分に制限してY信号に重畳することで、白黒テレビと互換性のあるカラーテレビ放送を実現しました(なお、現在のNTSC方式のカラーテレビ放送では、色差信号をさらに、

Q信号に変換して送っていますが、詳しくは文献1)を参照して下さい)。このような背景から、デジタルカラー画像を扱う際も、RGB信号を一度YUV信号に変換し、視覚特性を利用して4:2:2や4:2:0にサブサンプリングしてから、圧縮符号化をして蓄積や伝送を行うのが一般的になりました。ところが今では、白黒テレビとの両立性を考える必要はありませんし、伝送帯域や蓄積媒体の容量も以前とは比べものにならないほど大きなものになっています。また、画像の撮像系や表示系の進歩も目覚しく、特に画像の素材を扱う分野では、正確な色表現が大変重要になってきています。そのため、

最新の動画像符号化の国際標準規格であるMPEG-4 AVC/H.264では、4:4:4フォーマットを扱うHigh4:4:4 Professional Profileが策定されています。また近年、一部の映画館で上映されるようになってきたデジタルシネマでは、すでに4:4:4フォーマットが使われています(画像の圧縮手法にはJPEG2000という国際標準規格が使われています)。このような画像を扱う環境の変化により、これからは4:2:0や4:2:2だけでなく、RGB原信号をも含めたサブサンプリングによる画質の劣化のない4:4:4に対する需要がますます高まっていくことでしょう。

(2008年8月1日受付)

参考文献

- 1) 日下秀夫監修: “先端技術の手ほどきシリーズ「カラー画像工学」”, オーム社 (1997)
- 2) 酒井善則・吉田俊之共著: “映像情報符号化”, オーム社 (2001)
- 3) Ian E.G. Richardson: "H.264 and MPEG-4 Video Compression", Wiley (2003)



やまぎし しゅういち
山岸 秀一 1984年、東京大学理学部物理学科卒業。同年、(株)三菱総合研究所入社。2006年、三菱電機(株)入社。映像信号の符号化方式、およびデジタル信号処理方式の研究に従事。現在、同社情報技術総合研究所に所属。博士(理学)。正会員。

キーワード募集中

この企画で解説して欲しいキーワードを会員の皆様から募集します。ホームページ (<http://www.ite.or.jp>) の会員の声より入力可能です。また電子メール (ite@ite.or.jp), FAX (03-3432-4675) 等でも受け付けますので、是非、編集部までお寄せください。(編集委員会)