

高解像度高感度撮影のための単板DRE撮像処理方式

DRE (Dual Resolution and Exposure) Imaging Method with Single Image Sensor for High Resolution and High-Sensitivity Imaging

鵜川 三蔵
Sanzo Ugawa

吾妻 健夫
Takeo Azuma

今川 太郎
Taro Imagawa

岡田 雄介
Yusuke Okada

春日 繁孝
Shigetaka Kasuga

石井 基範
Motonori Ishii

要 旨

動画の高解像度と高感度を同時に実現するDRE (Dual Resolution and Exposure) 撮像処理方式を提案する。本方式は、視覚特性上、解像度に最も寄与する緑色を複数フレームに渡って長時間露光することによって、感度向上を図る。長時間露光中に被写体の動きによって生じる動きブレは、緑色と同時に短時間露光で撮影する青色と赤色の画像から検出した動き情報を用いて除去する。今回、DRE撮像を単板カラー撮像素子で実現するために、専用の撮像素子を開発した。本撮像素子の特徴は、ベイヤ配置された単板撮像素子において、緑色の画素は長時間露光し、赤色と青色の画素は短時間露光するために、色によって長短2種類の蓄積時間の動画像を読み出す構造をもつことにある。本撮像素子を用いて、動きブレを除去した従来比4倍の高感度撮像を実機実証したので報告する。

Abstract

We proposed a Dual Resolution and Exposure (DRE) method for high-sensitivity, high-resolution imaging, where its high sensitivity is realized by long-term exposure in green pixels while taking into account human vision characteristics. As a result of the extended exposure time of green pixels, motion blur becomes large. For the purpose of reducing the motion blur, motion information which is detected from red and blue pixels are applied to each frame. To implement this method in a DRE camera system, we developed a DRE image sensor which reads out two types of exposure images: long-term exposure from green pixels and short-term exposure from red/blue pixels. The proposed method achieved four times higher sensitivity without any motion blur than conventional imaging.

1. はじめに

近年、携帯電話用カメラやデジタルスチルカメラの小型化と多画素化の傾向が著しい。これは、撮像素子の画素の微細化により実現されているが、このような撮像素子では、特に動画撮像の際、一定の露光時間内に、撮像素子の画素の受光できる光量が低下するため、S/Nを確保した高解像度撮像が難しくなっている。

S/Nを確保するための従来のアプローチには、撮像素子の高感度化と信号処理によるものの2つがある。

撮像素子の高感度化のアプローチとして、空間的に画素の受光量を拡大するオンチップマイクロレンズ¹⁾や裏面照射²⁾といった技術がある。画素サイズが3 μm角程度までは、画素ごとに集光するためのオンチップマイクロレンズを搭載する構成により、感度向上が図られてきた。さらに微細な1.4 μm角レベルでは、フォトダイオードを配線層と反対側に設けた裏面照射型にすることで、画素の実効開口率を極限にまで近づけているが、100%を超えることは不可能である。

信号処理によるアプローチとして、低解像度画像を入力とすることで感度を保ちつつ、複数の低解像度画像からサブピクセルの画素値を推定することによって、高解像度な画像を生成する超解像³⁾や、長時間露光撮像によ

り光量を確保して感度を保ちつつ、長時間露光により発生する動きブレを処理により除去するデブラリング⁴⁾が存在する。しかし、超解像は、被写体とカメラが静止している場合に、高解像度化の効果が得られず、デブラリングは、撮像する被写体の動きがシーン内で一様でない場合、適用が困難である。

このように、撮像素子や信号処理の単独のアプローチでは、特に画素サイズが1.4 μm角を下回るような高解像度の動画撮像において、S/Nを確保することは困難であった。

この課題に対して筆者らは、撮像素子と信号処理の両方のアプローチを併用することにより、入力時に光量を確保し、信号処理により動きブレの除去と時空間解像度を向上するDual Resolution and Exposure (以後、DREと記す)撮像処理方式を提案している⁵⁾。この方式では、撮像に3板撮像素子を利用し、色(RGB)によって異なる時空間解像度で撮影することで、時間もしくは空間的に光量を確保する。また、信号処理では、時空間解像度の異なる動画の色間で解像度情報を相互補完することで、動きブレを除去した時空間解像度の高いカラー動画を生成する。

本稿では、これまで3板撮像素子を利用していたDRE撮像処理方式の撮像部をより小型化するための、撮像部の単板化について述べる。2章では、DRE撮像処理方式における撮像素子と信号処理の両方からのアプローチを説明

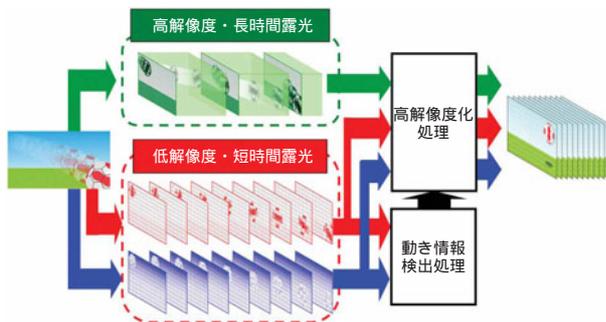
する。3章では、撮像部を単板化するためのシミュレーションと、その結果を基に新規に設計 / 開発したDRE専用の単板カラー撮像素子と、これを用いた高解像度高感度撮像の実機実証について述べる。4章では、本稿のまとめを述べる。

2. DRE撮像処理方式

DRE撮像処理方式は、撮像素子と信号処理の両方のアプローチを併用して高感度化を実現する。2.1節では、DRE撮像処理方式における撮像素子のアプローチについて述べ、2.2節では、信号処理のアプローチを説明する。この信号処理において、RGB間での動きが同一であることを仮定しているが、2.3節では、この仮定が実用上成立していることを被写体およびカラーフィルタの分光特性より示す。

2.1 色ごとに時空間解像度を変えた撮像方式

DRE撮像処理方式で用いる撮像素子は、第1図に示すように、RGBごとに異なる解像度（G: 高解像度、R/B: 低解像度）と露光時間（G: 長時間露光、R/B: 短時間露光）で撮像する。この撮像方法により、Gは時間的に光量を確保し、R/Bは空間的に光量を確保している。Gを高解像度で撮像するのは、主観的な解像度を高めるためである。人の視覚の空間分解能において、輝度成分は色差成分よりも高いことが知られている⁶⁾。また、輝度成分への寄与度は、RGBの中でGが最も高いため、Gを高解像度で撮像することが解像度改善に最も効果的であるといえる。



第1図 DRE撮像処理方式
Fig. 1 DRE method

2.2 2系統の時空間解像度を相互補完する信号処理

2.1節で説明した撮像方法では、光量が確保されたRGBの動画を撮像できるが、Gは時間的に、R/Bは空間的に解像度が低下する。DRE撮像処理方式の信号処理では、撮

像したRGBの動画の解像度情報を色間で相互補完することによって、高感度かつ時空間高解像度なカラー動画を生成する。この信号処理は、高解像度化処理と動き情報検出処理の2つで構成される。

高解像度化処理は、撮影した動画（入力動画）と生成するカラー動画（生成動画）との関係の計算項と、RGB間の相関を高める効果をもつ拘束項を用いて、評価式を作成し、評価式が最小となる生成動画を算出する。評価式 $J(f)$ を(1)式に示す。

$$J(f) = \|Hf - g\|^2 + \lambda_s \|Q_s f\|^2 + \lambda_m \|Q_m f\|^2 \dots \dots \dots (1)$$

f : 生成動画, g : 入力動画, H : 低解像度化変換
 Q_s : 滑らかさ拘束, Q_m : 動き拘束,
 s/ m : 計算項の重み定数

以下、(1)式の右辺の3つの計算項について説明する。

〔1〕誤差項

第一項は、生成動画を時間および空間方向に低解像度化した動画と実際の入力動画が類似した値になることを利用した計算項（誤差項）である。生成動画 f を、撮像過程のモデルによって、空間もしくは時間と空間の両方向に解像度を低下させた動画 Hf は、入力動画 g に近似した値になる。

〔2〕滑らかさ拘束項

第二項は、自然画において、統計的にRGB画像の画素値の空間分布が滑らかになることを利用した計算項（滑らかさ拘束項）である。生成動画 f の画素値が滑らかに分布する場合、 f を2階微分した値は小さくなる。滑らかさ拘束項では、 f のRGBを輝度と色差で表現される色空間に変換した上で、空間的な2階微分を求める。輝度や色差は、それぞれRGBを含むため、色変換後に、誤差項と滑らかさ拘束項の両方が小さい値になる f を求めることにより、空間的に高解像度なGの画素情報を低解像度なR/Bに伝播できる。

〔3〕動き拘束項

第三項は、移動する被写体の明るさが、多くの場合変わらないことを利用した計算項（動き拘束項）である。一般の自然画において、被写体が移動するときに明るさは変化しないため、動きの前後で画素値はほぼ変わらない。よって、生成動画 f において、フレーム間で移動している被写体の画素値の差分は小さい値になる。動き拘束項を加えることにより、長時間露光するGに含まれる動きブレを除去することができる。

動き拘束項は被写体の動き情報が必要になるため、動き情報検出処理において、R/Bの画素ごとにブロックマッチングを行う。DRE撮像処理方式では、RGB間の動きが

同一であることを仮定して、時間解像度の低いGにおける被写体の動き情報の代わりに、時間解像度の高いR/Bから求めた動き情報を利用する。

以後、評価式 $J(f)$ の最小化について説明する。評価式は、 f に関する2次形式なので、極小解が最小解となる。最小となる f を求めるには、(1) 式の右辺を f で偏微分したときに傾きが0となる f の値を求めればよい。よって、

$$H^T(Hf-g)+\lambda_S(Q_S)^T Q_S f+\lambda_m(Q_m)^T Q_m f=0 \dots\dots\dots (2)$$

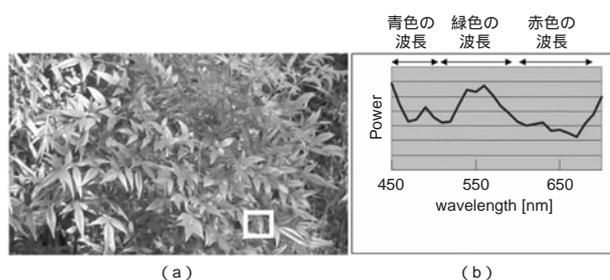
より、(2) 式は生成動画像 f に関する連立方程式となる。これを解くことで、目的とする高解像度、かつ高感度の動画像が得られる。

2.3 被写体の分光分布の影響

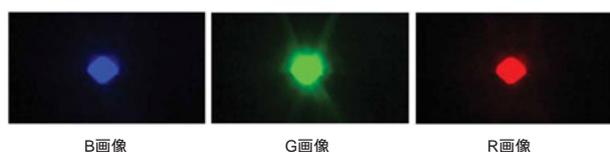
2.2節の高解像度化処理の動き拘束項では、RGB間の動きが同一であることを仮定して、R/Bから求めた動き情報をGの動き情報として利用する。この仮定が実用上成立することを、被写体の分光分布の例を示しながら述べる⁷⁾。

第2図 (b) は、第2図 (a) に示す自然画像の白枠部分について、分光分布を測定した結果である。分光分布のグラフより、緑色に見えている被写体であっても、赤色と青色の波長の光を含んでいることがわかる。これは、緑色に見えている被写体であっても、青の画素と赤の画素で被写体が検出できることを意味する。

また、第3図に緑色LEDのRGB画像を示す。緑色のLEDのように分光分布が特定の波長域で集中する場合でも、青色や赤色の光が検出できることを確認している。これは、



第2図 自然画像の分光分布
Fig. 2 Power spectrum of natural color image



第3図 緑LEDのRGB画像
Fig. 3 RGB images captured during imaging with green LED

撮像素子で利用するRGBの各カラーフィルタの透過特性に、クロストーク領域が存在するためである。

以上の測定結果から、被写体の分光分布はDRE撮像処理方式に与える影響が少ないことを説明できる。すなわち、われわれが通常目にする被写体は、被写体の分光分布自体がブロードなため、R/Bの動き検出結果をGで撮像する被写体の動きとして利用できる。

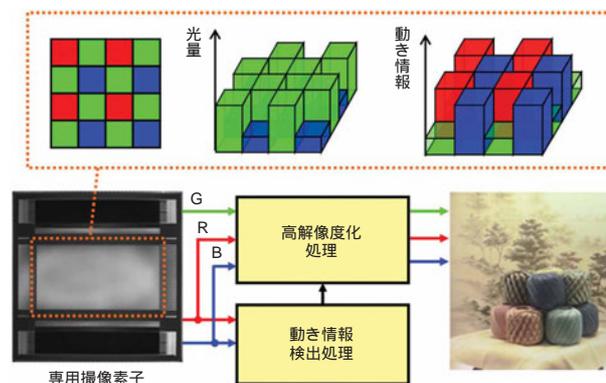
一方、LEDのように分光分布が特定の波長域で集中するような被写体の場合でも、撮像素子のカラーフィルタの透過特性がブロードで、RG間やGB間にクロストーク領域が存在するために、通常の被写体と同様に、R/Bの動き検出結果をGで撮像する被写体の動きとして利用できる。

3. DRE専用の単板カラー撮像素子の開発

DRE専用の単板カラー撮像素子の開発には、RGBの画素配置、Gの長時間露光のフレーム期間、R/Bの低解像度撮像を実現する画素加算の画素数を決める必要がある。そこで、最も光量が確保できる長時間露光のフレーム数と画素加算数をシミュレーションで確認した。以後、このシミュレーションと、その結果を反映した単板カラー撮像素子の構成と駆動方法を説明し、この撮像素子を用いたDRE撮像処理方式による実機実証の結果を示す。

3.1 専用撮像素子の設計に向けたシミュレーション

RGBの画素配置を考察し、Gの露光時間とR/Bの画素加算数をシミュレーションで検討する。考察とシミュレーションの結果、RGBはベイヤ配列で配置し、露光時間と画素加算数は通常撮像の4倍で撮像しても、処理後の動画は必要な画質 (30 dB) を得られることが明らかとなった。専用撮像素子を用いたDRE撮像処理方式の概要を、第4図に示す。



第4図 専用撮像素子を用いたDRE撮像処理方式
Fig. 4 DRE method using single image sensor

〔1〕RGBの画素配置

専用撮像素子は、RGBをベイヤ配列で画素配置した。この配置では、長時間露光の画素と短時間露光の画素が1画素ごとに交互に存在している。以後、このRGBの画素配置の理由を説明する。

一般に、同一被写体を構成する近傍画素の動きは、フレーム間でほぼ同一とみなせるので、長時間露光のような時間解像度が低い画素は、周囲の画素が短時間露光であれば、短時間露光の動き情報を効率よく反映できる。そこで、専用撮像素子に長時間露光の画素と短時間露光の画素を1画素ごとに交互に配置した。

Gは長時間露光の画素に割り当て、R/Bは短時間露光の画素に、画素の数が等しく、かつ専用撮像素子上で間隔が均一になるように割り当てる。このとき、専用撮像素子のRGBの画素配置はベイヤ配列と同じになる。

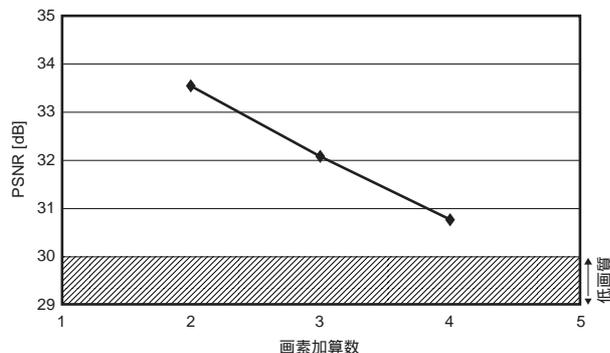
〔2〕露光のフレーム期間と画素加算数

露光時間や画素加算の数があれば光量は増えるが、時空間解像度の低下が進むため、高解像度化が困難になる。そこで、露光時間と処理後の動画の画質との関係をシミュレーションにより確認した。

実験で用いた動画は、(社)映像情報メディア学会監修の標準動画20シーンとした。シミュレーションの入力画像は、長時間露光の画像を、同色の画像のフレームの加算平均によって作成し、低解像度の撮像をフレーム内の画素の加算平均によって作成する。また、フレームの加算数とフレーム内の画素の加算数は同じにする。

標準動画を正解動画とし、この正解動画を時間および空間方向に低解像度化した動画を入力動画としたとき、DRE撮像処理後の動画が正解動画とどの程度近いかを評価する。画質評価の指標としてPeak Signal to Noise Ratio (以後、PSNRと記す)を用いた。PSNRは、値が高いほど正解動画に近い。

入力動画の画素加算数とPSNRの関係を、第5図に示



第5図 DRE撮像処理方式のPSNR特性

Fig. 5 PSNR property of DRE method

す。第5図のグラフのPSNRは、入力20シーンの平均値を示している。また、PSNRの値が30 dB以上であれば、動画に必要な画質が確保できているとみなしている。DRE撮像処理方式では、画素加算数が増加するとPSNRが低下するが、4画素加算までは十分な画質が得られる。以上のことから、高解像度化処理後の動画の画質を考慮するとき、最も光量を確保できる長時間露光のフレーム数と画素加算数を4とした。

3.2 専用撮像素子の構成と駆動方法

RGBをベイヤ配列で画素配置し、Gは4フレーム期間の露光撮像ができ、R/Bはフレーム内で4画素加算して撮像可能なDRE専用の単板カラー撮像素子を新規に開発した^{8),9)}。開発した専用撮像素子のスペックを、第1表に示す。以下、専用撮像素子の構成と駆動方法を説明する。

第1表 開発した専用撮像素子のスペック

Table 1 Specification of single image sensor for DRE method

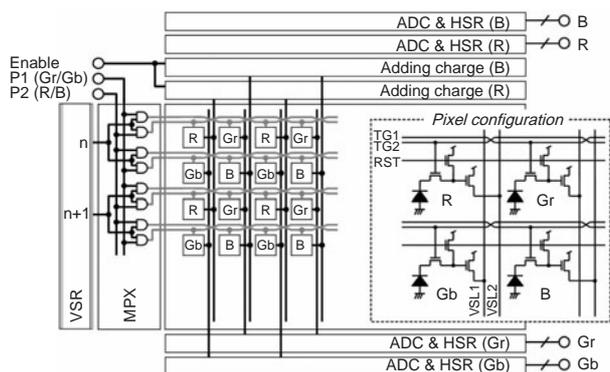
Process technology	0.25 μ m 1P3M
Effective pixels	4120 (H) \times 2172 (V)
Optical format	2.2/3 inch
Horizontal channel	4ch (Gr/Gb/R/B)
Aspect ratio	9 : 16
Conversion gain	70 μ V/ele
Full well capacity	15 000 ele
Noise floor	5 ele
Sensitivity	2000 mV/lux/s
Frame rate	24 fps
Output signal	10 bit digital full parallel
Output frequency	66 MHz
Supply voltage	3.0 V
Package	144 pin LCC

〔1〕専用撮像素子の構成

専用撮像素子の基本構成を、第6図に示す。この撮像素子は3つのnMOS トランジスタとフォトダイオードで1画素を構成しており、約4000 \times 約2000 画素に対して、RGBをベイヤ配列で配置している。

従来回路の垂直シフトレジスタ (VSR) は1行分だけを駆動する。これに対して、本撮像素子では、露光時間の異なるGr/GbとR/Bとを独立に転送するために、マルチプレクサ (MPX) を使用することにより2行分を駆動する。Gr/Gb画素制御信号 (P1) あるいはR/B画素制御信号 (P2) は1度に2行分を制御することができ、従来回路と比較しパルス周波数を半減している。

また、画素のトランスファゲートを制御する水平制御線も、Gr/Gb画素用、R/B画素用それぞれ独立にしている。第6図において、Gr/Gb画素に対してはTG1、R/B画素に対してはTG2がそれぞれの水平制御線に対応する。これによ



第6図 専用撮像素子の回路ブロック図
Fig. 6 Circuit block diagram of image sensor

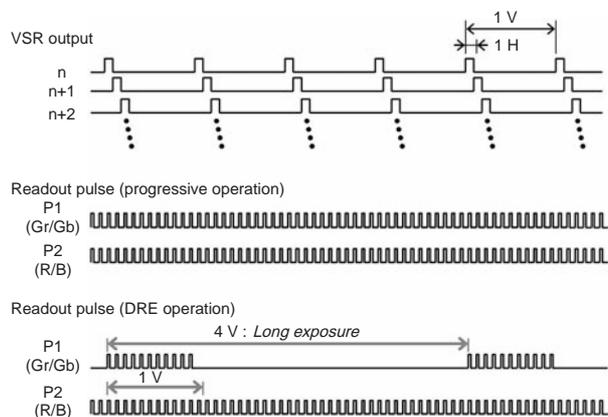
って、Gr/Gb画素とR/B画素に対し互いに異なった駆動方法が適用でき、露光時間、読み出しタイミングをGとR/B間で独立に制御できる。

【2】専用撮像素子の駆動方法

専用撮像素子は、従来と同じ動作であるプログレッシブモードと、DREモードの2つの動作モードで駆動することができる。これら2つの動作モード時のタイミングチャートを、第7図に示す。

プログレッシブモード時には、全水平期間においてP1, P2を駆動し、画素加算回路をOFFにしておく。

一方、DREモード時にはP1, P2画素加算回路の動作を以下のように変更する。まず、P1 (Gr/Gb用)の駆動パルス数は、プログレッシブモードの駆動パルス数に対し1/4にする。さらに、P2 (R/B用)はプログレッシブモードと同条件で全水平期間駆動させるが、画素加算回路をONする。このとき、Gr/Gb画素を4フレームに1回アドレスングすることになり、蓄積時間が4フレーム分になった信号が読み出される。一方、R/B画素は毎フレームアドレスングし、画素加算回路により、2×2画素分の電荷を



第7図 制御パルスのタイミングチャート
Fig. 7 Timing diagram of control pulse

混合し読み出す。したがって、Gr/Gb画素、R/B画素それぞれの感度は、プログレッシブモード時と比較して4倍に改善できる。このように、DREモードでは、TG1とTG2の2つの水平制御線を用いることで、Gr/Gb画素のみ蓄積時間を長くすることができる。また、画素加算回路を有することにより、R/B画素の加算を実現できる。

3.3 DRE専用撮像素子の撮像処理結果

開発した専用撮像素子を用いて、DRE撮像処理を行った。通常撮像した動画像との比較を、第8図に示す。DRE撮像処理方式は、従来の撮像と比較して、光量と解像度を同時に確保した動画撮像を実現している。



第8図 DRE撮像処理結果
Fig. 8 Result of DRE method

4. まとめ

本稿では、DRE撮像処理方式における撮像方式と信号処理の内容、新規に設計 / 開発したDRE専用の単板カラー撮像素子を用いた実機検証について述べた。単板カラー撮像素子を利用した場合、光量を最大4倍にした高感度な動画撮像を実現できることをシミュレーションで示し、この実験を基に、DRE専用の単板カラー撮像素子を設計 / 開発した。

今後は、高解像度化処理のハード化を含め、リアルタイム処理の実現に取り組むとともに、信号処理の演算量低減を図り、実用化を目指す。

参考文献

- 1) Z. D. Popovic, et al. : Technique for monolithic fabrication of microlens arrays. Applied optics 27, No.7, p.1281 (1988).
- 2) S. Iwabuchi et al. : A back-illuminated high-sensitivity small-pixel color cmos image sensor with flexible layout of metal wiring, ISSCC, p.302 (2006).
- 3) R. Y. Tsai et al. : Multiframe image restoration and registration, Advances in Computer Vision and Image Processing 1, No.2, p.317 (1984).

- 4) B. Bascle et al. : Motion deblurring and super-resolution from an image sequence. The 4th European Conference on Computer Vision, p.573 (1996).
- 5) 今川太郎 他：高解像度高フレームレート化と露光量確保のための時空間解像度が色ごとに異なるカラー画像からの動画画像生成 電子情報通信学会論文誌D 92, No.8, p.1229 (2009).
- 6) 三橋哲雄 他：画像と視覚情報科学（コロナ社）p.78 (2009).
- 7) 鷓川三蔵 他：高感度と高解像度の動画画像を生成するDRE方式の被写体の分光分布に対する性能評価 SSII, IS2-09 (2010).
- 8) T. Azuma, et al. : 2.2/3-inch 4k2k cmos image sensor based on dual resolution and exposure scheme ISSCC, p.348 (2010).
- 9) 石井基範 他：2.2/3インチ単板カラー4K2K CMOS イメージセンサ 映情学技報 34, No.16, p.39 (2010).

著者紹介



鷓川三蔵 Sanzo Ugawa
 セミコンダクター社 半導体デバイス研究センター
 Semiconductor Devices Research Center,
 Semiconductor Company
 2008年9月～2010年11月 先端技術研究所に所属



吾妻健夫 Takeo Azuma
 先端技術研究所
 Advanced Technology Research Laboratories
 工学博士



今川太郎 Taro Imagawa
 先端技術研究所
 Advanced Technology Research Laboratories
 工学博士



岡田雄介 Yusuke Okada
 先端技術研究所
 Advanced Technology Research Laboratories



春日繁孝 Shigetaka Kasuga
 セミコンダクター社 半導体デバイス研究センター
 Semiconductor Devices Research Center,
 Semiconductor Company



石井基範 Motonori Ishii
 セミコンダクター社 半導体デバイス研究センター
 Semiconductor Devices Research Center,
 Semiconductor Company