

感度自動調整機能を有する人工網膜LSI

非会員 宇井 博貴, 非会員 有馬 裕,
非会員 村尾 文秀, 非会員 小守 伸史, 非会員 久間 和生 (三菱電機(株))

An Artificial Retina Chip with Pixel-wise Self-Adjusting Intensity Response Hiroki Ui, Yutaka Arima, Fumihide Murao, Shinji Komori and Kazuo Kyuma (Mitsubishi Electric Corporation)

A human retina like, wide operating-range CMOS image sensor with pixels that shift their intensity-response curves according to the intensity of light has been constructed. The chip realizes an operating range 28dB wider than that of conventional CMOS image sensor. The chip integrates 128×128 pixels whose size is $24 \times 24 \mu\text{m}^2$ with $0.8 \mu\text{m}$ single poly-Si and double metal CMOS technology. The chip size is $6.0 \times 4.6 \text{mm}^2$.

キーワード：固体撮像素子，CMOSイメージセンサー，網膜（retina），感度，ダイナミックレンジ

1. 開発の背景

人間の視覚系において各々の視細胞はその周辺の視細胞からの出力平均と自分自身との差を出力する機能を有している。この機能により、各視細胞は、受光感度範囲の幅は一定であるものの、その周辺に入射する光強度の平均に応じてその受光感度範囲をシフトする。すなわち、極端に輝度の異なる被写体が同一視野内にある場合、明るい被写体を見る視細胞はその受光感度範囲を明るい側に、暗い被写体を見る視細胞は暗い側にシフトする。このような受光感度範囲をシフトする機能により、人間の視覚系は全体として、個々の視細胞の受光感度より広い受光感度範囲を実現している（図1）。

一方、CCDやCMOSイメージセンサーなどの固体撮像素子で、同一視野内に極端に輝度の異なる被写体が存在する対象を撮影する場合、その対象の輝度分布の広がりがある人間の視覚によって十分に認識できる範囲内であっても、明るい被写体がハレーションを起こす、あるいは暗い被写体が黒くつぶれてしまうような画像になる場合がしばしば見受けられる。

CCD、CMOSイメージセンサーなどの固体撮像素子は、その素子上に入射する光を光強度と露光時間に応じた電気信号に変換する機能単位（画素）が複数個配列される構造を持つ。一般に各画素はいずれも等しい受光感度範囲を持ち、その受光感度範囲は固定されている。素子の受光感度範囲も各画素の受光感度範囲に等しい。従って、各画素の受光感度範囲を超える輝度の広がりを持つ対象を撮影しようとする場合、上述した明るい被写

体のハレーションや暗い被写体の黒つぶれなどの現象を起こす。

従来の固体撮像素子は、受光感度範囲、コントラスト検知機能において、人間の視覚系に大きく劣っている。監視用カメラなど人間の視覚の代用、あるいは画像を記録し、後に人間がその画像を見る、といった使用法が固体撮像素子の一般的な使用形態であることを勘案すると、従来の固体撮像素子は受光感度範囲、コントラスト検知機能の面でその性能は不十分である。

広い受光感度範囲を実現するために、これまでに各画素の受光感度範囲の幅を広げる研究がなされている。

一例としては、異なる露光時間で撮影した画像を重ね合わせることでダイナミックレンジを拡大する手法がある[1]-[5]。同一視野内に極端に輝度の異なる被写体が存在する対象を撮影する場合、暗い被写体を撮影するための長い露光時間で撮影した画像と、明るい被写体を撮影するための短い露光時間で撮影した画像とを重ね合わせることで、明暗いずれの被写体もハレーションや黒つぶれなく画像上に表す手法である。

あるいは、トランジスタのサブスレッショルド領域における非線形な入出力特性を利用して各画素自体の受光感度幅を広げる研究などもある[6]。

しかしその手法に関わらず、各画素のダイナミックレンジや受光感度幅を拡大する手法では、撮影した画像を表示する際に画面全体のコントラストが弱くなる問題が発生する。しかし、網膜のように各視細胞が受光範囲をシフトするのであればコントラストは低下しない（図

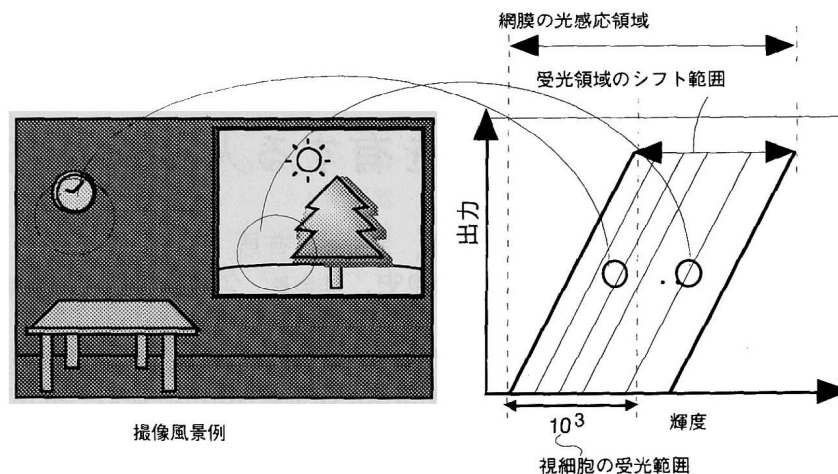


図1 人間の視細胞の受光範囲と網膜の光感応領域

2) . 網膜のような機能を画像後処理で行う方法も提案されている。例えば、画像をいくつかの領域に分割し、各領域内で集中している輝度範囲に表示系の階調を多く与える手法が提案されているが[7]、この手法は複雑な画像の後処理を必要とする問題がある。

人間の網膜のように、各画素が周辺の画素の出力に応じてその受光感度範囲をシフトする機能を有する固体撮像素子も既にC.Meadによって試作されている。この素子の画素回路を図3に示す[8]。この素子では抵抗ネットワークを介して周辺の画素出力の平均化を行い、この周辺画素出力の平均と、自分自身の出力との差を差動増幅器を用いて演算している。本素子では人間の視覚系の視細胞のように、各画素が受光感度範囲をシフトすることで素子全体として広い受光感度範囲を実現している。各画素の受光感度範囲は広がっていないので、素子として受光感度範囲を広げたことによる、表示系において画面全体のコントラストが低下する問題は発生しない。

しかしながら、この素子では各画素に差動増幅器を必要とするため、回路規模が大きく、また、消費電力も大きいという実用上の問題があった。

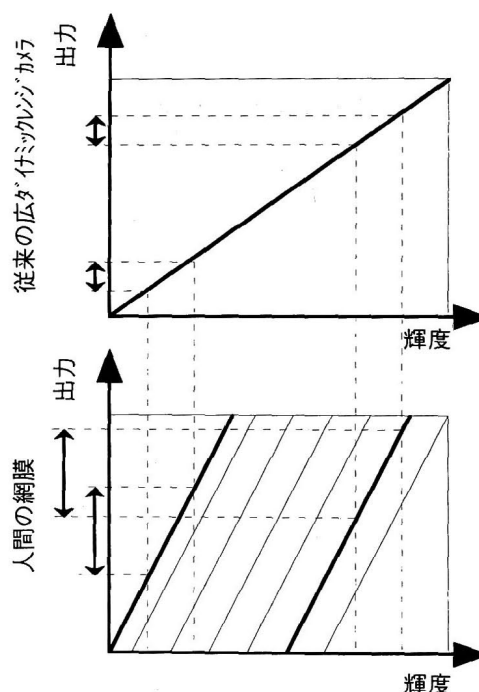


図2 人間の網膜と従来型広ダイナミックレンジカメラのコントラスト比較

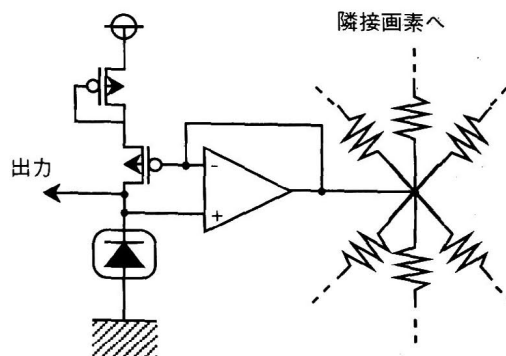


図3 C.Meadの人工網膜画素

2. 人工網膜LSI

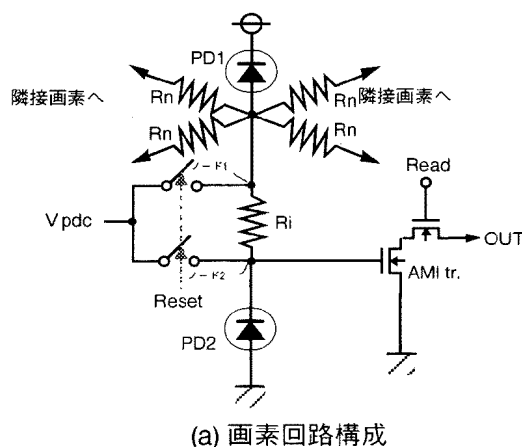
我々はこれまでに、エッジ抽出などの網膜機能の一部を集積化したイメージセンサを開発してきた[9][10]。今回、我々は上述した人間の網膜の持つ局所的感度調整機能に着目し、広い受光適応範囲を持つ固体撮像素子を開発した。このように網膜の機能を集積化しているチップをここでは人工網膜LSIと呼ぶことにする。

人工網膜LSIの画素回路を図4に示す。各画素内において、電源（Vdd）とグランド（Gnd）の間に、二つのフォトディテクター（PD）を抵抗を挟んで直列に接続し、一方のPDと抵抗の接続ノードを信号読み出し用AMI（Amplified MOS Imager）トランジスタのゲートに接続する。さらに、信号読み出し用トランジスタが接続されていない方のPDと抵抗の接続ノードを近傍の画素間で相互に抵抗（あるいはトランジスタのソース・ドレイン）を介して接続する。二つのPDの光電特性は全く同一で、光量Dの光が照射された時の逆方向電流を I_d とし、二つのPDに挟まれた抵抗の抵抗値を R_i と仮定する。抵抗 R_n 、 R_i はトランジスタで構成し、抵抗値はそれぞれのトランジスタのゲート電圧で調整できるようにした。

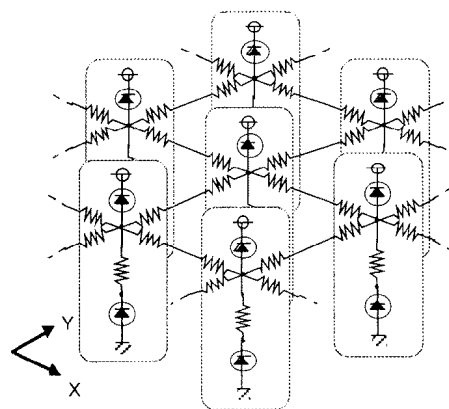
まず、簡単のため、信号読み出し用トランジスタおよび画素間の抵抗接続が無い場合（図5）の動作について説明する。図5中の抵抗両端のノード1とノード2は、予め任意の電圧 V_{pdc} （一般にVddとGndの間の値）に固定された後、時間 $t=0$ で解放されたものとする。tが十分に経過した後のノード1の電圧 V_1 とノード2の電圧 V_2 を図6に示す。電圧 V_1 と V_2 は初期電圧 V_{pdc} を中心に画素に照射される光量Dに比例した電流 I_d と $R_i/2$ の積に対応する電圧を振幅として照射光量に比例して乖離する。時間tが0の場合は、 V_1 と V_2 共に初期電圧 V_{pdc} であり、時間が経過するに従って、回路の時定数によって図6中の V_1 、 V_2 に向かって漸進することが容易に想像できる。次に、ノード2に信号読み出し用トランジスタのゲートが接続された場合を考える。図7に示すようにトランジスタのゲートは電気的には付加容量 C_m が接続されているものと考えられる。また二つのPDの容量を C_{pd} とする。この場合、tが十分に経過した後のノード1の電圧 V_1 とノード2の電圧 V_2 を図8に示す。電圧 V_1 と V_2 は、 V_1 と V_2 の差が画素に照射される光量Dに比例した電流 I_d と R_i の積に対応する振幅となるものの、図6の場合と異なり、接続された容量が大きい方のノード2の電圧 V_2 の光量Dに対する傾きは小さくなる一方、 V_1 の傾きは大きくなる。この回路構成においても、時間tが0の場合は、 V_1 と V_2 共に初期電圧 V_{pdc} である。しかし、時間が経過するにしたがって、ノード1とノード2の時定数が異なることによって V_1 と V_2 の傾きが異なる結果となる。つまり、容量が比較的大きなノード2はノード1よりもゆっくりと変化する結果、光量Dに対する V_2 の傾きが小さくな

る。

次に、図4に示すようにノード1に隣接画素のノード1と抵抗 R_n を介した相互接続がある場合を考える。このノード1の隣接画素間 R_n 接続によって、ノード1の電圧 V_1 は近傍画素の受光量が平均された値に平滑化されることになる。例えば、ある領域内に分布する画素の受光量が $a \sim b$ の範囲にある場合、図9内に示すように、ノード1の電圧は、十分な時間が経過すると、受光量の分布に従い、 V_{1a} と V_{1b} との間の V_{1c} （この値は光量の分布具合で決まる）付近に平滑化される。平滑化の時定数はPD1の容量 C_{pd} と画素間接続する抵抗 R_n の大きさによって決まる。その結果、図9内に示すように、受光量aの画素の V_1 は平均値との差に対応する電圧分（ $V_{1c}-V_{1a}$ ）上方へシフトし、それに伴って V_2 も同電圧分上方へシフトする。また、受光量がbの画素では、 V_1 が平均値との差に対応する電圧分（ $V_{1b}-V_{1c}$ ）下方へシフトし、それに伴って V_2 も同電圧分下方へシフトする。つまり、各画素のノード1を抵抗 R_n を介して相互接続することによって、信号読み出し用トランジスタのゲートに接続されたノード2の電圧 V_2 は、画素近傍の受光量の平均値を中



(a) 画素回路構成



(b) 画素間接続

図4. 人工網膜LSI画素回路

心としてその画素の受光量と近傍平均値との差の信号を表現することになる。但し、その中心値は光量が大きくなるに従って初期設定電圧 V_{pdc} からのズレが大きくなる。この中心値のズレはノード2に接続された容量値を大きくすることで小さくすることができる。図10は各光量域での光量と V_2 との関係例を示す。

図10の読み出し信号を反転増幅した場合を図11に示す。増幅率を変えることで光量の変化に対する信号の変化(傾き)を変えることができ、コントラストを調整することができる。しかし、この増幅率と受光感度検知領域の限界は画素間接続がない場合の光量に対する V_2 の傾きによって制限される。

図11に示されたように、本チップの画素回路は周辺の画素の明るさに応じてその受光範囲をシフトし、画素アレイ全体で広い光感応領域を実現している。

また、感度、平滑化される画素範囲の広さは抵抗 R_i 、 R_n の抵抗値によって変えることができるが、本チップでは抵抗 R_i 、 R_n をトランジスタで構成し、その抵抗値をトランジスタのゲート電位で調整できるので、感度、平滑化の範囲を撮像対象に応じて調整可能である。

PDの容量 C_{pd} は約10fF、AMIトランジスタのゲート容量 C_m は約20fFである。この容量の差により、 V_2 の V_{pdc} からの乖離は V_1 の約1/3となる。また、 R_n 、 R_i は数百G

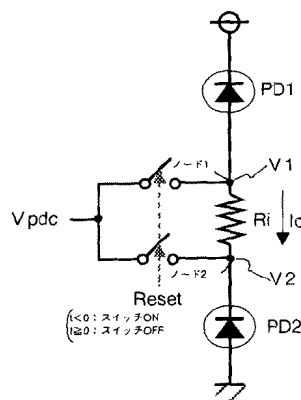


図5.人工網膜LSI画素回路
動作説明図 - 1

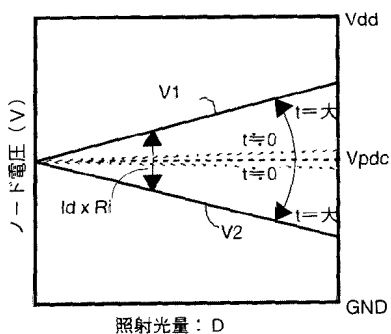


図6. 図5の画素回路の動作

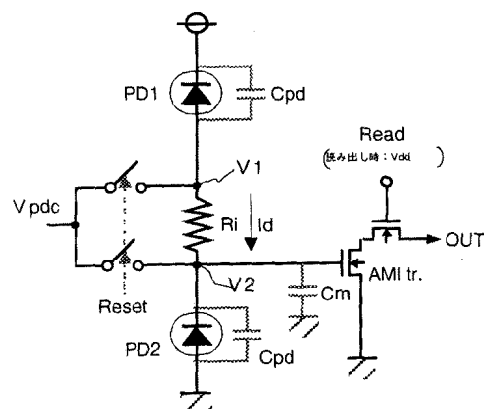


図7 人工網膜LSI画素回路
動作説明図 - 2

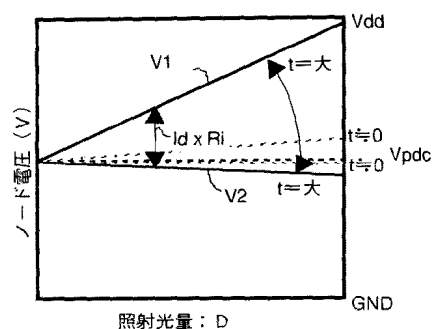


図8. 図7の画素回路の動作

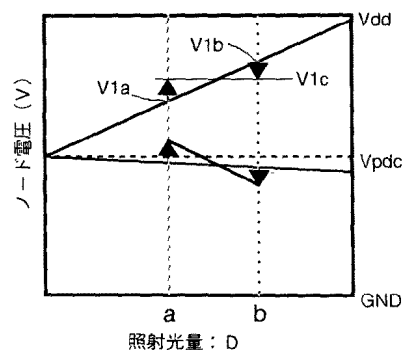


図9. 図4の画素回路の動作

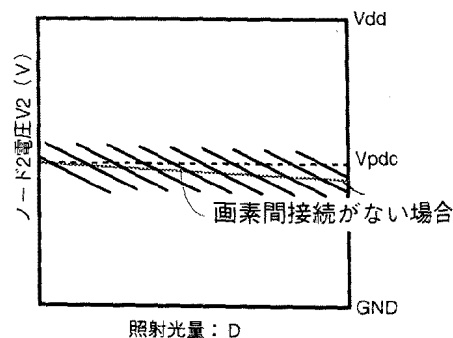


図10. 人工網膜LSIの感度特性

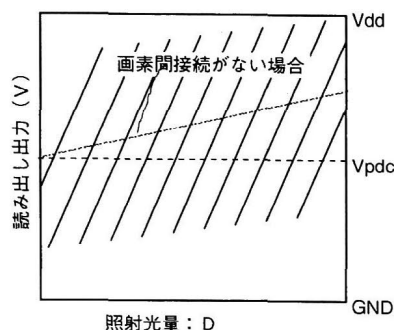


図11. 人工網膜LSIの出力特性

Ω 程度となるよう両抵抗を構成するトランジスタのゲート電圧を調整した。Id~数十pAとすると、ノード1, 2の電位の乖離は<1msecで収束する。また、V1の平滑化の時定数は数十msec ($\approx C_{pd} \times R_n$) となり、10msec程度の露光時間であれば、近傍の数十画素程度の範囲で平滑化が行われる。

3. 撮像例

人工網膜LSIの撮像例を図12, 13に示す。図12(a),(b)と図13(a),(b)は本チップで撮影した画像、図12(c),(d)と図13(c),(d)は比較のため従来型のMOSイメージセンサ（図14）で撮影した画像である。本チップも、従来型のMOSイメージセンサも同一のプロセスで集積したものである。図12は屋内の暗い情景と屋外の明るい情景が同時に存在する対象を撮影したものである。従来型MOSイメージセンサで撮影した画像は、図12(c)では屋内情景が黒つぶれし、図12(d)では屋外の情景がハレーションを起こしている。一方、本チップで撮影した画像では、屋内・屋外のいずれの情景も黒つぶれやハレーションがなく撮影されている。図13は太陽による逆光下での撮影結果である。従来型のMOSイメージセンサで撮影した図13(c),(d)では図12のときと同様にそれぞれ黒つぶれ、ハレーションを起こしているが、本チップで撮影した図13(a),(b)では逆光下でも雲や、手前の建物が撮影されている。図13(a),(b)では太陽の周辺が特に暗くなっている。これは太陽とその周辺での輝度差が非常に大きいためである。

以上の撮像結果での従来型のCMOSイメージセンサとの露光時間の比より、従来型イメージセンサに比べ、28dB以上広い感応領域を実現していることがわかった。

4. まとめ

本チップの写真を図15に示す。本チップは0.8 μ mルールCMOS 1層ポリシリコン、2層メタル配線技術を用いて16,384画素を6.0mm \times 4.6mm角に集積している。消費電力は20,000lx照射時で約20mWである。

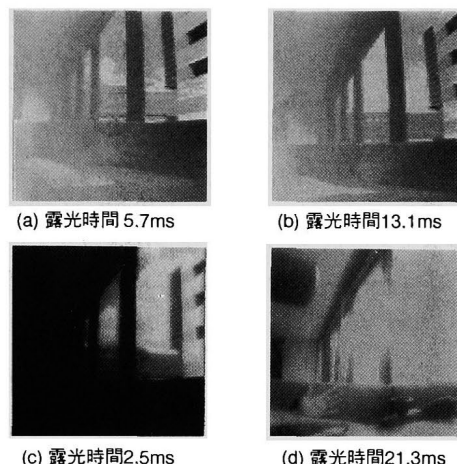


図12. 撮像例 1（屋内から明るい屋外を撮影）
(a),(b): 人工網膜LSIで撮影
(c),(d): 従来型CMOSイメージセンサで撮影

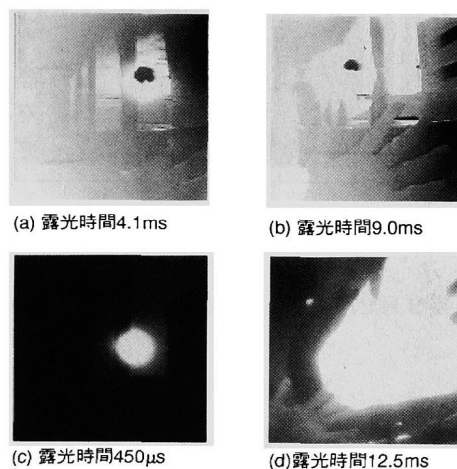


図13. 撮像例 2（屋内から逆光風景を撮影）
(a),(b): 人工網膜LSIで撮影
(c),(d): 従来型CMOSイメージセンサで撮影

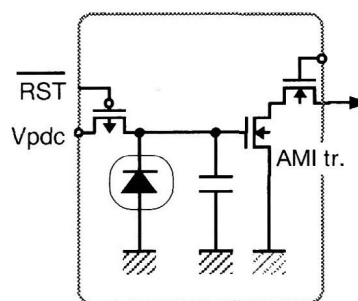


図14. 従来型CMOSイメージセンサ

人工網膜LSIは、人間の網膜のように各画素が受光領域をシフトする機能を備えており、広い受光感度範囲と高いコントラスト検知機能を実現する高い環境適応能力

を持ったカメラとして、様々な環境下で使用される監視用カメラや車載用カメラなどに利用できる。

本チップではPDが2つ必要であるため、開口率が小さくなってしまう。抵抗を介して直列に接続される2つのPDをウェハ断面縦方向内に構成するなど、開口率の低下を防ぐ方策が今後の検討が必要である。

また、本チップではノード1の電位が平滑化されるため、リセット電位のばらつきによる固定パターンノイズ(FPN)は見られなくなるものの、Riのばらつきに起因するFPNが現れる。本チップではFPNが従来型の画素構造に比べ約2倍となっており、FPN対策も今後の検討課題である。

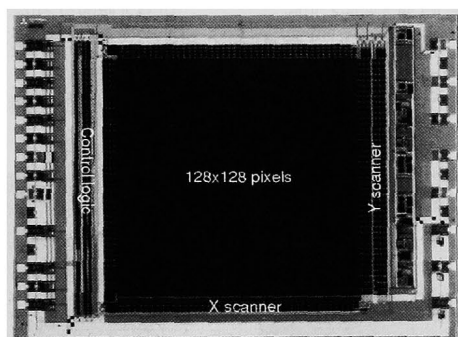


図15. チップ写真

(平成11年9月27日受付, 平成12年2月9日再受付)

文 献

- [1] 菰淵 寛仁, "広ダイナミックレンジ撮像技術", 第7回画像入力技術シンポジウム講演予稿集, pp.85-92
- [2] S.G.Chamberlain, "Photosensitivity and Scanning of Silicon Image Detector Arrays", IEEE, J.Solid-State Circuits, vol.SC-4, No.6, pp.333-342, Dec., 1969
- [3] F.Andoh, K.Taketoshi, J.Yamazaki, M.Sugawara, Y.Fujita, and K.Mitani, "A 250,000-Pixel Image Sensor with FET Amplification at Each Pixel for High-Speed Television Cameras", ISSCC digest of technical papers, pp.212-213, Feb., 1990
- [4] Y.Endo, Y.Egawa, N.Harada, and O.Yoshida, "A Photoelectric Conversion Characteristic Control Method for Interline Transfer CCD imager", IEEE Trans on ED, vol.ED-32, No.8, pp.1511-1513, Aug., 1985
- [5] S.Decker, R.McGrath, K.Brehmer, and C.Sodini, "A 256×256 CMOS Imaging Array with Wide Dynamic Range Pixels and Column-Parallel Digital Output", ISSCC digest of technical papers, pp.176-177, Feb., 1998

[6] S.G.Chamberlain, and J.P.Y.Lee, "A Novel Wide Dynamic Range Silicon Photodetector and Linear Imaging Array", IEEE Trans on ED, vol.ED-32, No.2, pp.175-182, Feb., 1984

[7] 森村 淳, 吾妻 健夫, 魚森 謙也, "広ダイナミックレンジ画像合成処理技術", 映像情報メディア学会誌vol.51, No.2, pp228-232

[8] C.Mead, "Adaptive Retina", Analog VLSI Implementations of Neural Systems, 1989, pp.239-246

[9] K.Kyuma, E.Lange, J.Ohta, A.Hermanns, B.Banish and M.Oita, "Artificial retinas - fast, versatile image processors", Nature, vol.372, pp.197-198, 1994.

[10] E.Funatsu, Y.Nitta, Y.Miyake, T.Toyoda, J.Ohta and K.Kyuma, "An Artificial Retina Chip with Current-Mode Image Processing Functions", IEEE Trans. Electron Devices, vol.44, pp.1777-1782, Oct. 1997.

宇井 博貴



(非会員) 1970年3月26日生まれ。1994年東京大学大学院物理工学専攻修了。同年三菱電機(株)に入社。入社後、ニューロプロセッサの開発を経て、多機能CMOSイメージセンサの開発に従事。現在、同社AR事業推進プロジェクトグループ所属。電子情報通信学会会員。

有馬 裕



(非会員) 1960年1月13日生まれ。1985年3月熊本大学大学院物理学専攻修了。同年4月三菱電機(株)に入社。同社LSI研究所、半導体基礎研究所および先端技術総合研究所にてニューラルネットワークLSIおよびフォトニックLSIの研究開発に従事。1998年工博(東大)。2000年4月から九州工業大学助教授。電子情報通信学会会員。

村尾 文秀



(非会員) 1980年、東北大学工学部電子工学科卒業、同年三菱電機(株)に入社。以来、アナログLSI、アナデジ混載LSI、光センサLSIの開発に従事。現在、同社AR事業推進プロジェクトグループ所属。

小守 伸史



(非会員) 昭53京都大・工・数理卒。同年、三菱電機(株)入社。以来、MOSデバイスのシミュレーション、およびデータフロープロセッサ、ニューロプロセッサ、DRAM、人工網膜LSI等の研究開発に従事。現在、同社先端技術総合研究所・イメージング・システム技術部・フォトリソグロウ技術グループマネージャー。神戸大学・大学院・自然科学研究科客員教授を兼務。工博。電子情報通信学会、IEEE各会員。

久間 和生



(非会員) 1949年 生まれ。1977年3月 東工大大学院電子物理工学専攻博士課程修了(工学博士)。現在、三菱電機株式会社システムLSI事業統括部ARプロジェクト部長、先端技術総合研究所専任、東工大大学院客員教授、神戸大学客員教授を兼務。専門は光エレクトロニクス、ニューラルネットワーク。桜井賞(1991)、市村賞(1996)等を受賞。IEEE、OSAのFellow。