
知能制御システム学

イメージセンサの基礎

東北大学 大学院情報科学研究科

鏡 慎吾

swk(at)ic.is.tohoku.ac.jp

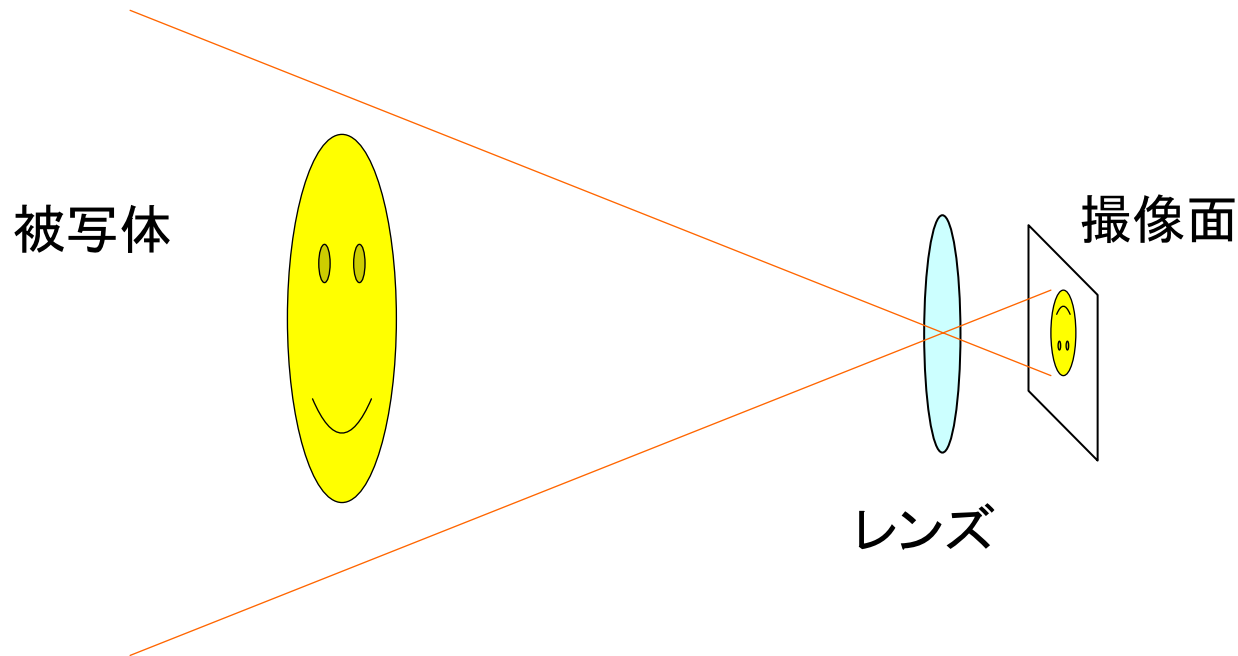
2007.06.05

今日の目的

- コンピュータビジョン, ビジュアルサーボなどの技術における「情報の入り口」であるイメージセンサ技術の基礎を学ぶ
- CCD, CMOSイメージセンサの仕組み, 違い, 特性を理解する

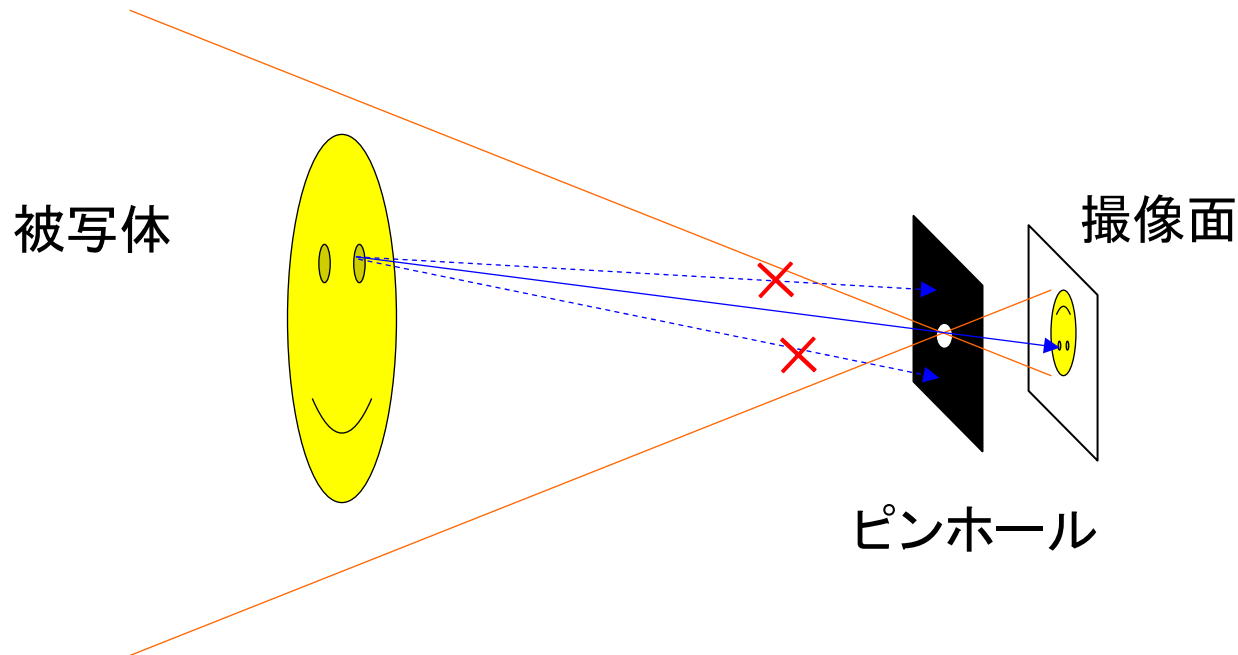
[米本2003] [Wong1999]

イメージセンサ, カメラ とは



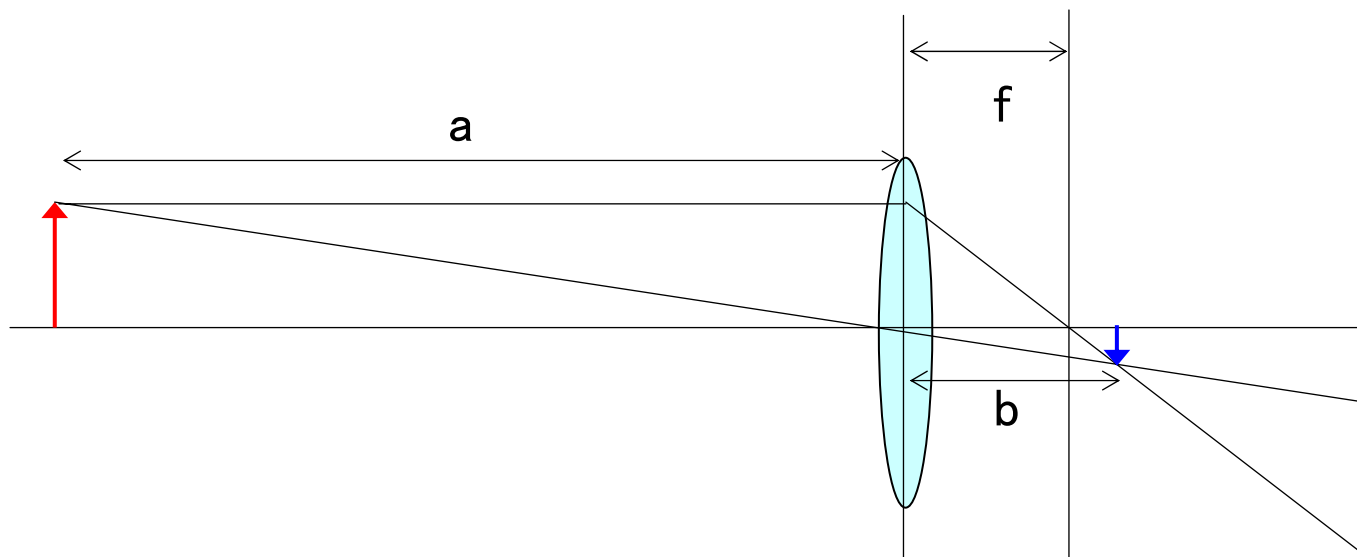
- 被写体から出た光が, レンズを通して撮像面に結像する (3D → 2D)
- 撮像面における明るさの度合い(後でちゃんと定義)を, 何らかの信号として読み出す (2D → 2D). 普通は電気信号.
- レンズ系などを含めた 3D → 2D の変換系全体をカメラと呼ぶことが多い
- 撮像面の 2D光分布 → 信号出力 の部分をイメージセンサと呼ぶことが多い

ちょっとだけ光学系の話



- 基本はピンホールレンズである.
- 撮像面のある一点に当たる光は, その点とピンホールを結ぶ直線上のどこかから発せられたものである.
- 被写体までの距離は理論上無制限
- ピンホールを通らない光は無駄 → 光量を稼げない

(理想)レンズ



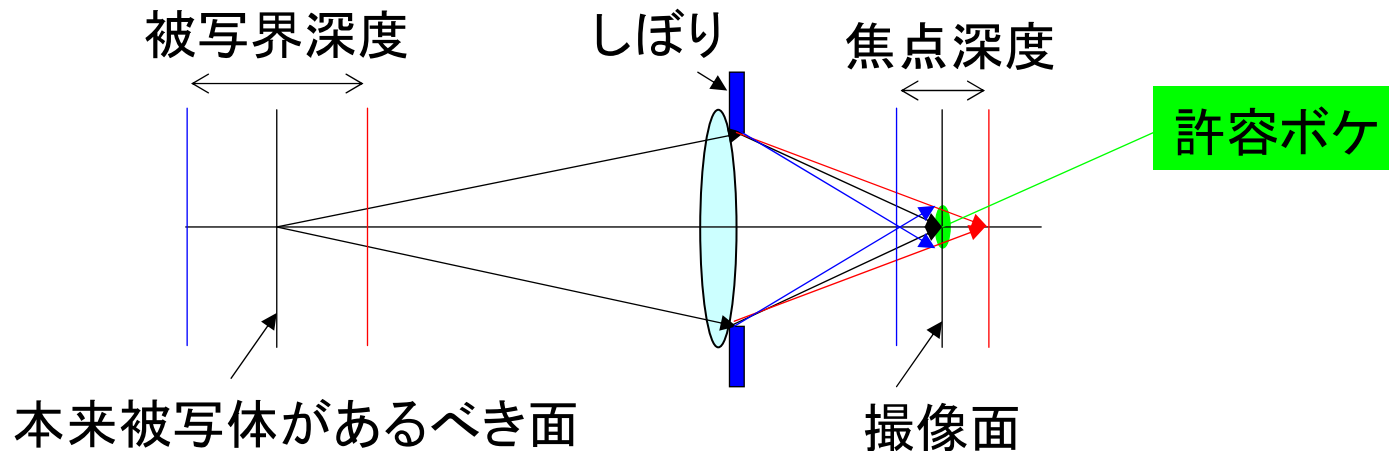
焦点距離 f のレンズで、距離 b の位置に撮像面があるとすると、距離 a の位置にある被写体だけが距離 b の面に結像する。
ただし a は以下で与えられる:

$$1/a + 1/b = 1/f$$

ピンホールとは違って被写体を置ける位置は一定距離に限られるが、より多くの光を集めることができる。

理想レンズの被写界深度

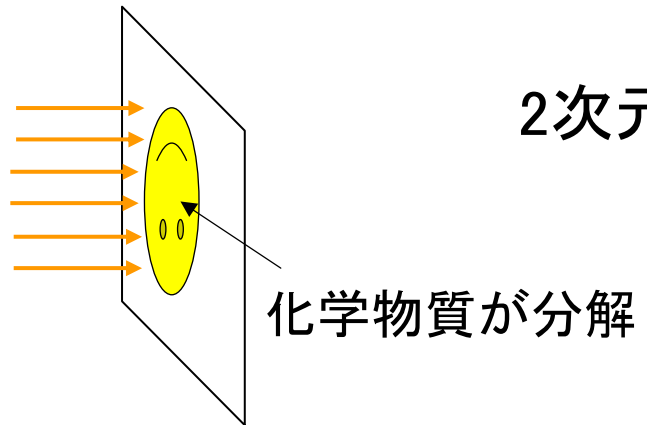
ではある一定の距離にあるぺらぺらのものしか写せないのか?
→ 被写界深度の範囲内ならば大丈夫



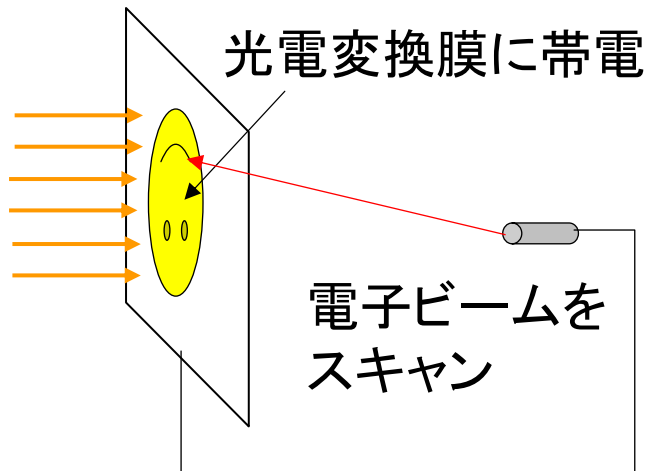
- 許容ボケの範囲内なら光線がずれてもわからない(撮像素子の空間解像度は、固体撮像素子だろうと銀塩だろうと有限である)。
- 許容の大きさと、レンズの有効口径との幾何学的関係から焦点深度が決まり、 $1/f = 1/a + 1/b$ から被写界深度が決まる
- レンズを絞れば絞るほど、ピントが合いやすくなる。(その分暗くなる)

撮像

2次元の面上に照射される光の強さを測りたい



- ・人間の目: 光エネルギーによって視細胞の中の物質(ロドプシン)が分解し, それがかっかけとなって神経細胞が興奮する



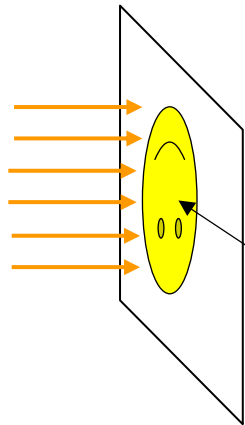
- ・銀塩カメラ: 光エネルギーでハロゲン化銀を分解



- ・撮像管: 光エネルギーで電荷が発生し, それを電子ビームの走査で順に信号電流として読み出す

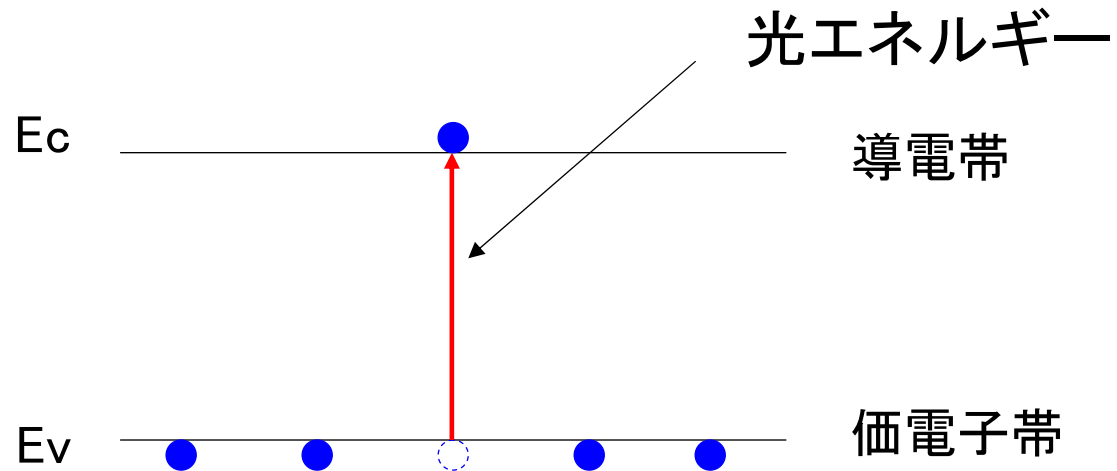
→
信号電流

固体撮像素子



電子が発生

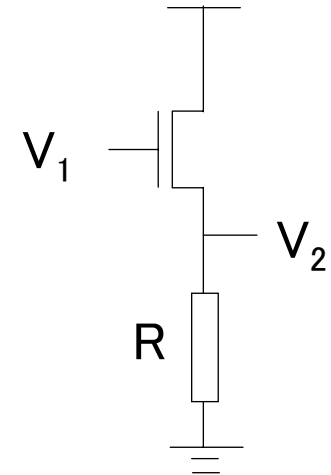
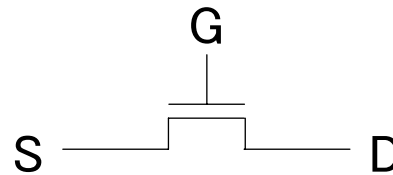
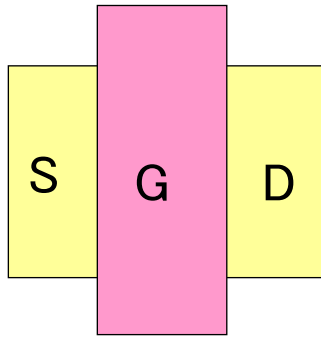
光エネルギーによってシリコン内部の電子が励起し、
信号として取り出せる状態になる (内部光電効果)



半導体の予備知識

シリコン上に、不純物やら酸化膜やらを整形して回路を集積する

上面から見たところ

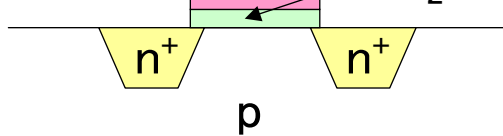


- Gに電圧をかけるとSとDの間に電流を流せるようになる (= MOS スイッチ)

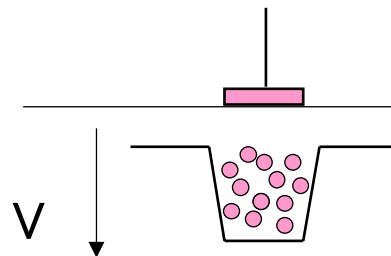
- $V_2 = V_1 + \alpha$
(ソースフォロワアンプ)

PolySi

SiO₂



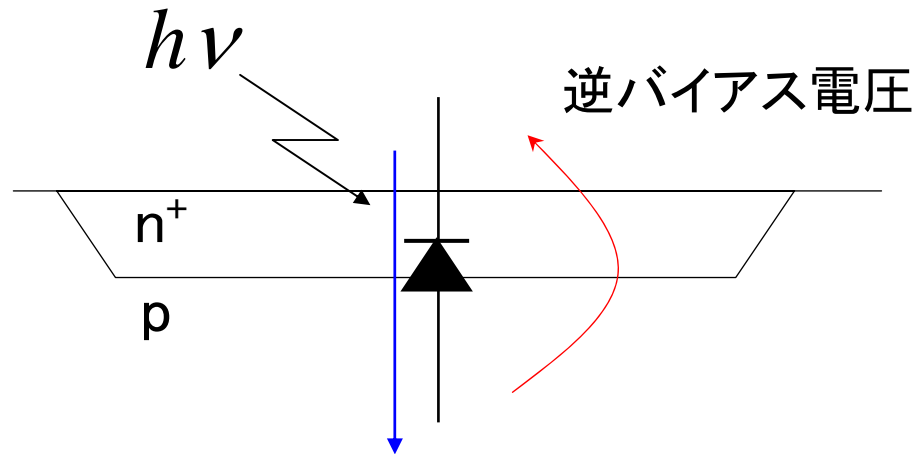
断面から見たところ



- 局所的に電位の高い場所を作ると、そこに電子をためたりできる

光電変換（フォトダイオード）

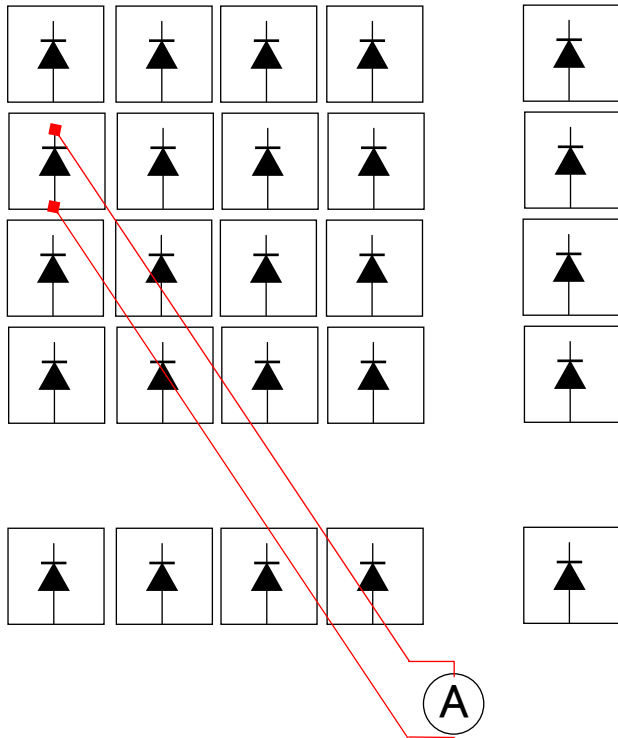
フォトダイオードと呼ばれる構造を用いることが多い



i 明るさに比例した光電流が流れる
(と考えると分かりやすい)

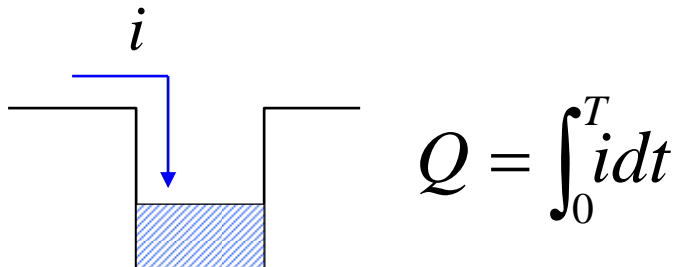
- 光通信用のフォトダイオードなどでは、この光電流を増幅して信号検出に利用する。
- イメージセンサでは、これを画素でいったん蓄積することが多い

光電流の蓄積



画素数の本数だけ(1メガピクセルなら 100万本)信号線を引き出して来れない限り, 時分割多重で読み出す必要がある

→ ある画素の信号を読んでいる間, 他の信号が捨てられるようではもったいない(光電流は微弱である)



時間積分することで, 雑音成分を相対的に低減する (S/N比を上げる)

ポテンシャルの井戸を作りそこに電荷を閉じ込める

固体撮像素子: CCD と CMOS

現在の主流は大きく二つに分かれる

CCDイメージセンサ

特殊な製造プロセス

高感度・低雑音

消費電力が大きい

機能化が困難

CMOSイメージセンサ

標準CMOSプロセス

一歩劣るが改善されつつある

消費電力が小さい

機能化が容易

よくある誤解

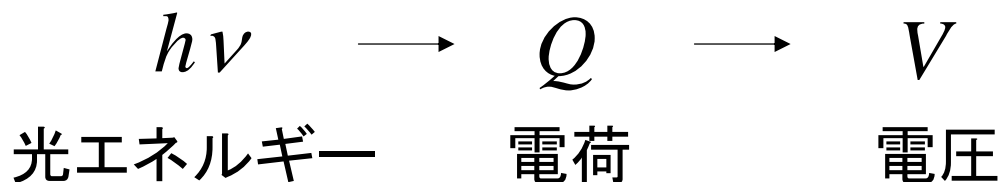
× CCDというのは光検出素子の種類である

CCD: Charge-Coupled Device

× CMOSというのは光検出素子の種類である

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

→ 実はどちらも、光検出の原理自体はほぼ同じである
信号の読み出し方が違うだけ



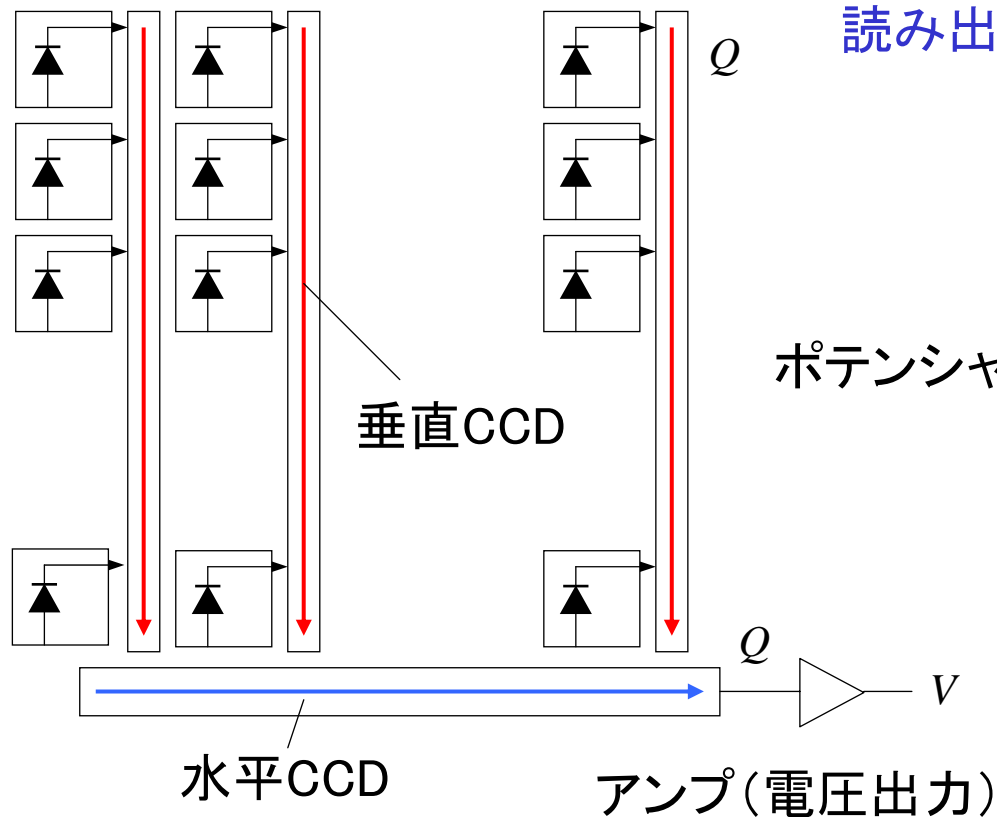
ここまでを画素で行うのがCCD（電圧への変換は画素アレイの外）

ここまでを画素で行うのがCMOS

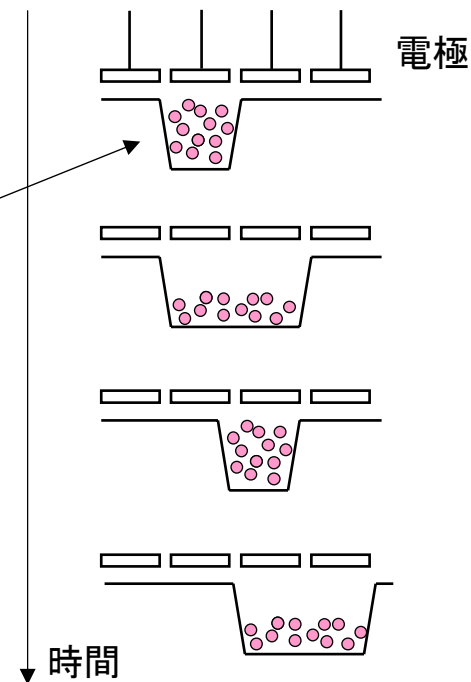
CCD の場合

(インターライン転送型 CCD)

- 電荷をバケツリレーのように転送
- 転送後に, 1つずつ電圧に変換して読み出す



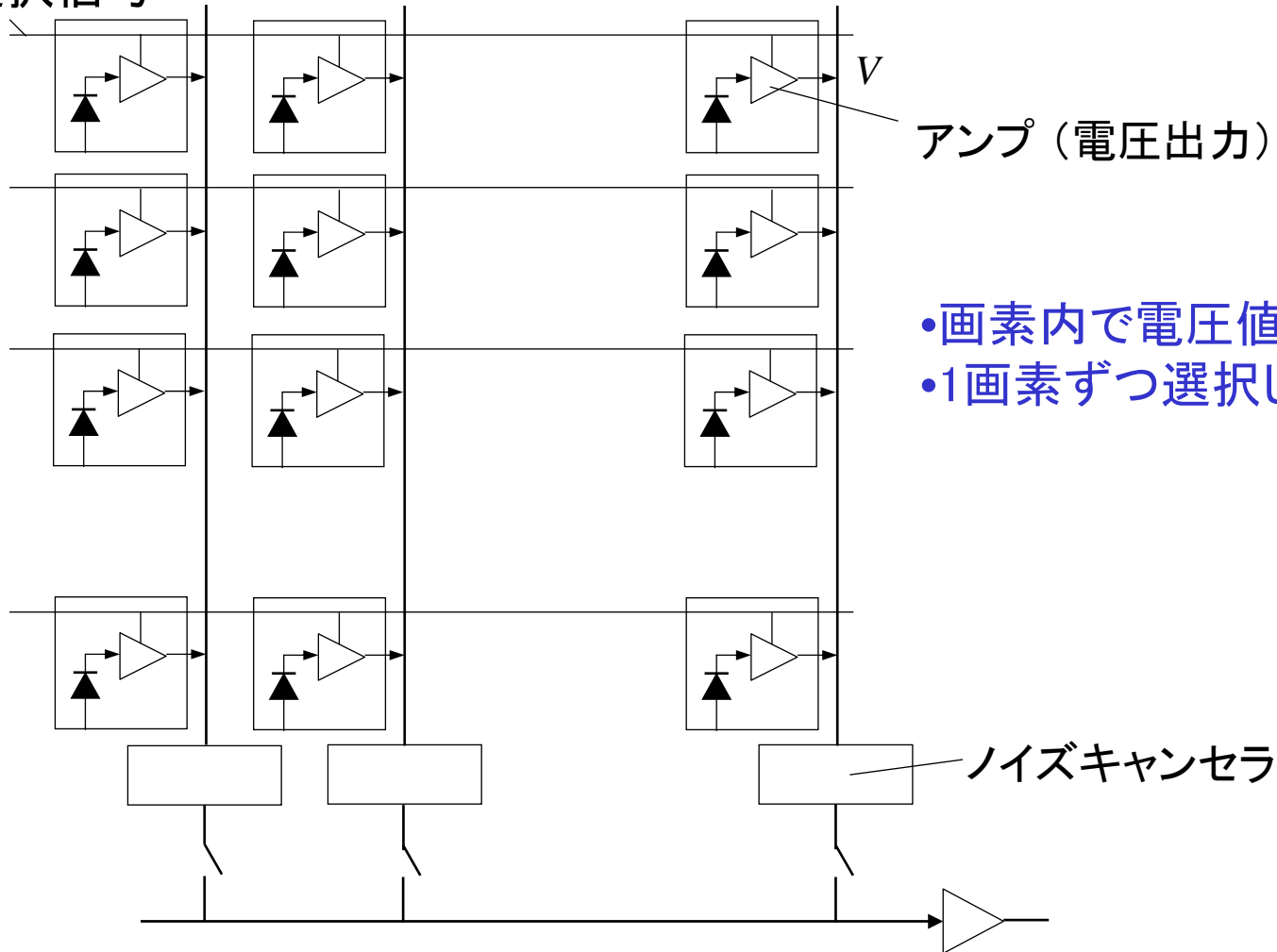
ポテンシャル井戸



(模式図. 本当はもっと複雑)

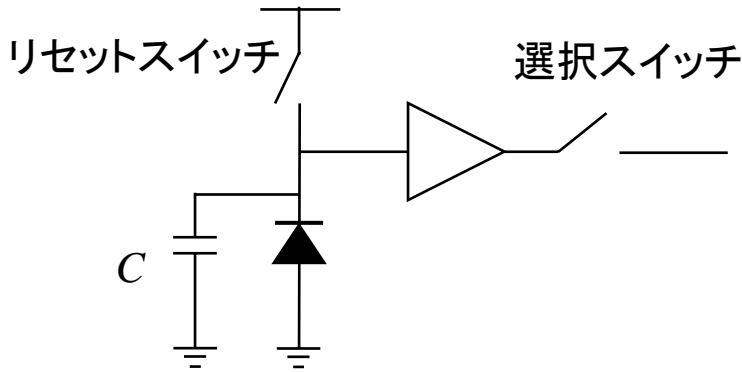
CMOS の場合

行選択信号

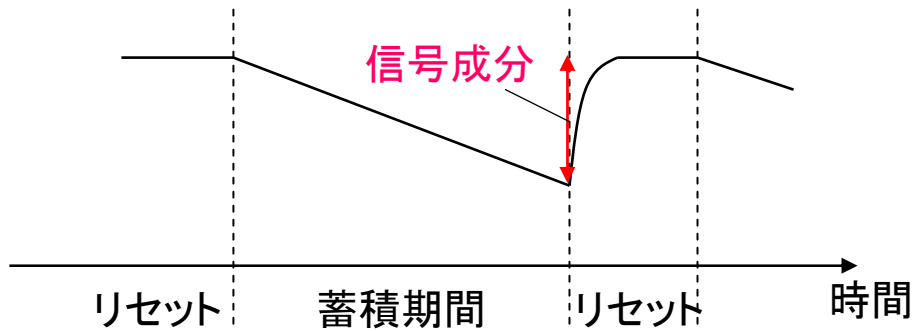


CMOS アクティブピクセルセンサ (APS)

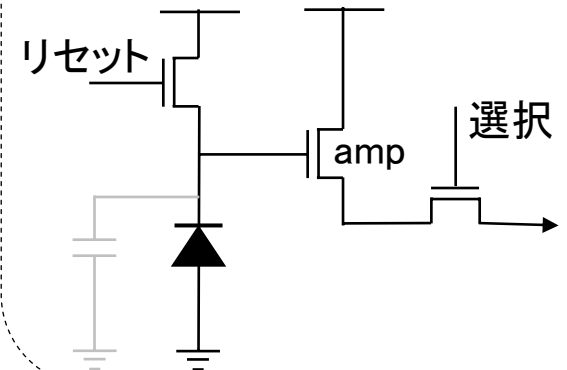
CMOS APS の画素構成



- 発生した電荷 Q を, 容量 C に蓄積する
- 電圧成分 $V = Q/C$ をアンプを通して読み出す (アンプといっても増幅率はほぼ 1)



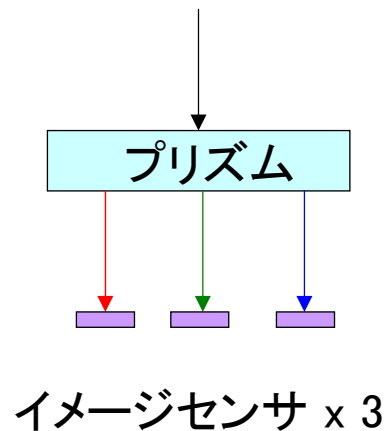
(詳細回路)
3トランジスタ APS



cf. アンプのない場合 (パッシブピクセル) と比べて, 低雑音, 高速性, 画素数に関するスケールビリティなどで有利

カラー化

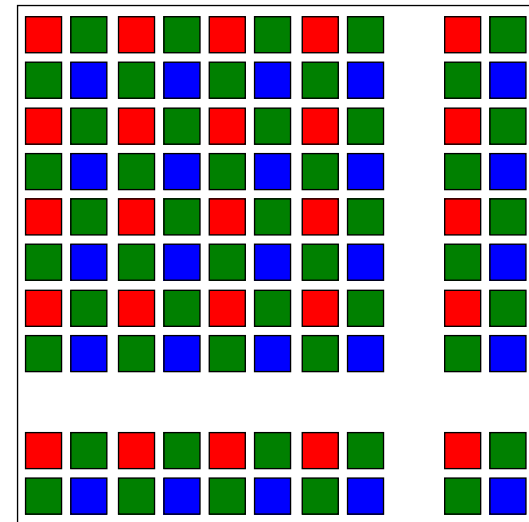
3板式



プリズムで光を RGB にわけ
3つのイメージセンサで撮像

性能はよい. コストが高い

単板式



1つのイメージセンサ
画素ごとにカラーフィルタを並べる

性能は落ちる. コストは低い

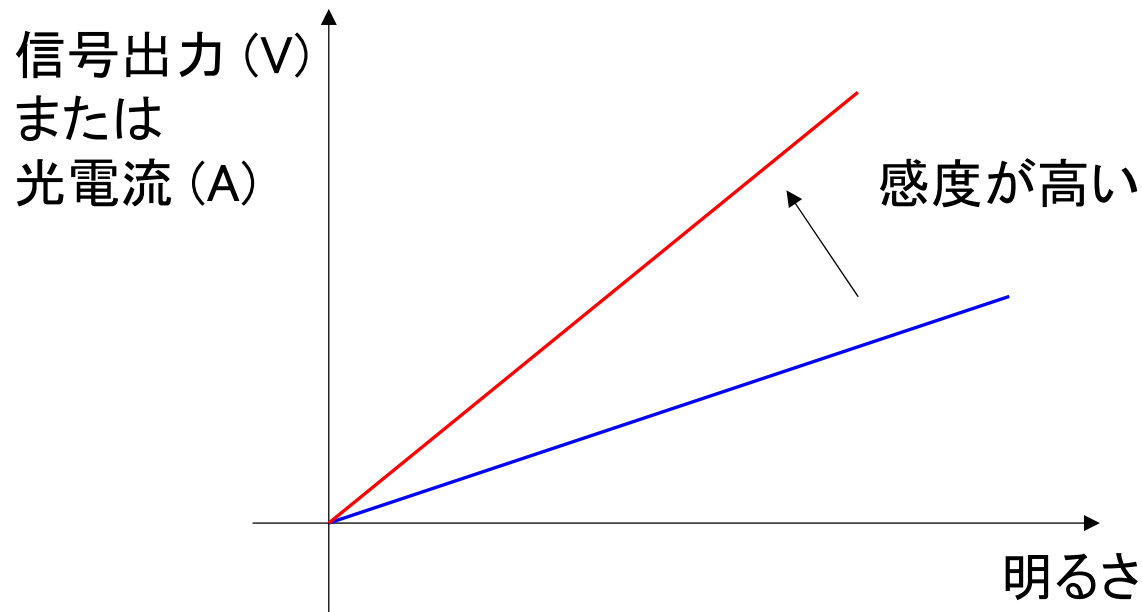
イメージセンサの性能

- 感度
- ノイズ
- ダイナミックレンジ
- 空間解像度
- 速度

感度

入力である光の強さに対する信号の大きさの比

同じ強さの光に対して、大きな信号が出るほうが感度がよい



放射量と測光量

放射量

(物理的なエネルギーに基づく量)

放射エネルギー [J]

エネルギーそのもの

放射束 [W]

単位時間あたり

放射照度 [W/m^2]

単位時間・
単位面積あたり

放射強度 [W/sr]

e.g. 照明点光源
の明るさ

放射輝度 [$W/sr/m^2$]

e.g. 照明面
の明るさ

測光量

(放射量の分光密度に標準
比視感度をかけて積分)

光量 [$lm \cdot s$]

光束 [lm]

照度 [lx]

光度 [cd]

輝度 [cd/m^2]

イメージセンサの感度は、例えば $V/lx/s$ など

感度を決める要因

・量子効率 (quantum efficiency: QE)

フォトン1 に対して電子1 が 100%
厳密にはデバイスで決まる値だが, 反射・回折の影響を入れる場合も多い

・開口率 (fill factor)

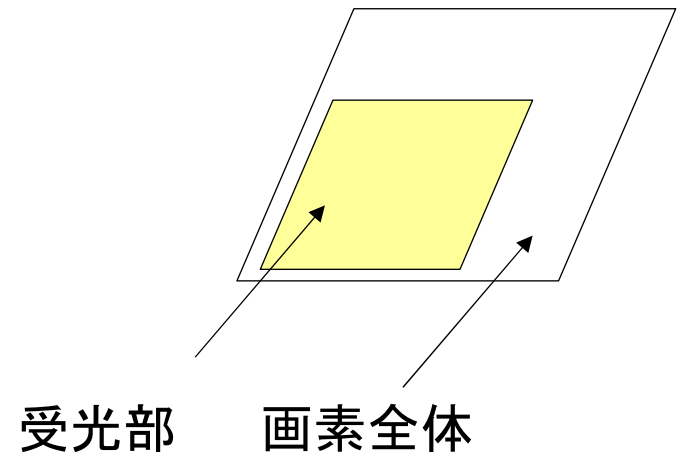
受光部の面積 / 画素の面積

・マイクロレンズの効率

・電荷 → 電圧 の変換効率

CCD なら画素の外, CMOSなら画素
の中が勝負

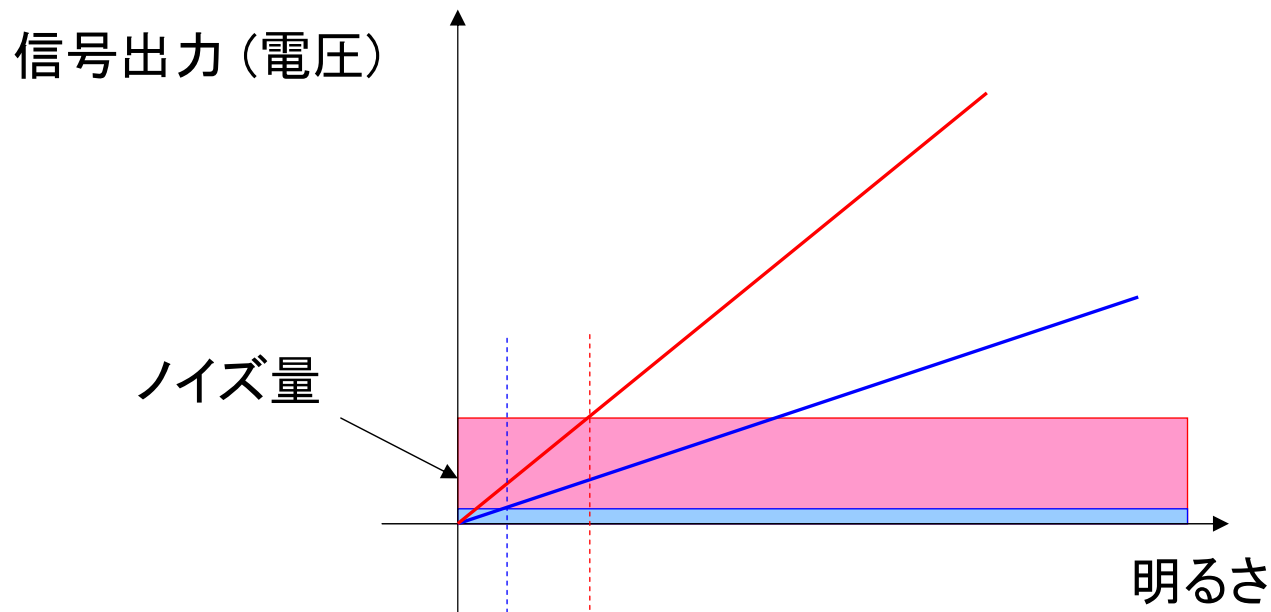
$V = Q / C$ なので小さい容量で変換
するのが重要



ノイズ

感度さえよければよいわけではない

ノイズによって、測定限界(感度限界)が決まる



赤で表されたセンサの方が「感度」はよい

しかし、青で表されたセンサの方が暗いところまでよく撮れる

フォトダイオードのノイズ

暗電流:

光が当たっていないのに流れてしまう電流
流れる量が分かっているなら問題ない. 実際には, 画素ごとにばらついたり, ゆらいだりする

ショットノイズ:

不規則なゆらぎ成分. 本質的に避けようがないとされる
信号の電子数を N として \sqrt{N} がノイズの平均電子数

- 暗電流ショットノイズ
- 光ショットノイズ

単位時間当たり N 個の信号電荷が発生するとする, 時間 t だけ蓄積すると,

・蓄積される信号電荷は tN

・蓄積されるノイズ電荷は \sqrt{tN}

S/N 比は \sqrt{tN} . よって \sqrt{t} に比例して S/N 比が改善する

CCDイメージセンサのノイズ

電圧への変換アンプで発生するノイズ

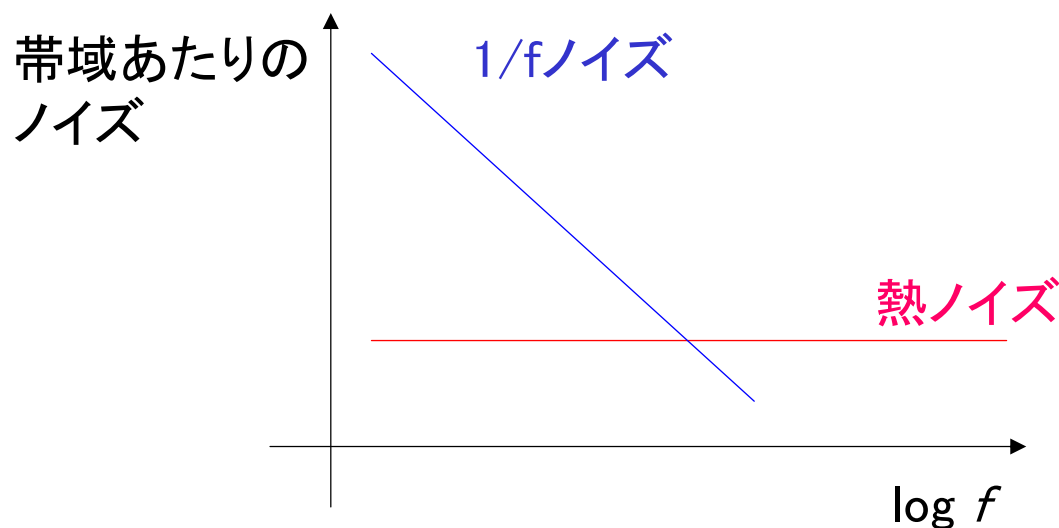
- リセットノイズ (kTCノイズ)

サンプルホールド時に抵抗の熱雑音を拾ってしまう
相関二重サンプリング (CDS) によって除去可能 (後述)

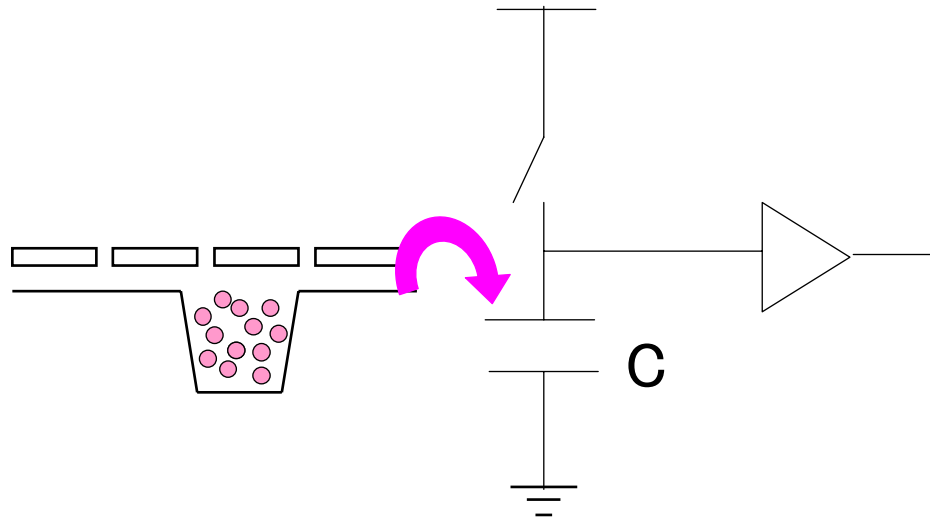
- アンプの $1/f$ ノイズ

CDSによって抑圧効果あり

- アンプの熱ノイズ



相関二重サンプリング



1. スイッチをオンにして C をリセット(充電)して, オフする (リセットノイズ発生)
2. 電圧を読み出す
3. 信号電荷を C に転送
4. 電圧を読み出す
5. 読み出した2回の電圧の差を取る
(リセットノイズがキャンセルされる.
比較的近い時刻なので, $1/f$ も抑圧される)

CCDイメージセンサのノイズ (その他特有のもの)

スミア

明るい部分の上下に縦に白いラインが発生
垂直CCDへの電荷混入が原因

残像

電荷を完全転送できずに次のフレームに残ってしまう
動画撮影時に問題

スミアの例



Photo. from [impress]

CMOSイメージセンサのノイズ

固定パターンノイズ ← 支配的

主にトランジスタ特性(しきい値)の製造時ばらつきによる

- 画素にあるアンプのばらつき
- 列ごと回路のばらつき

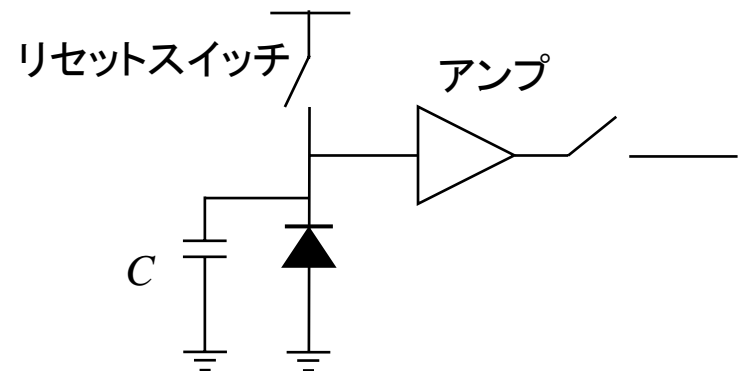
リセットノイズ

1/f ノイズ

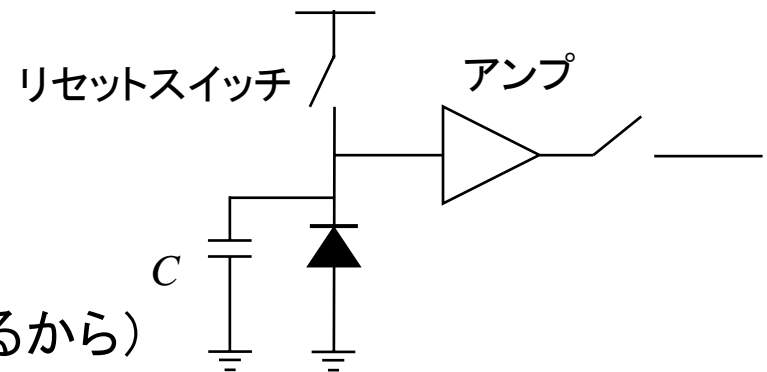
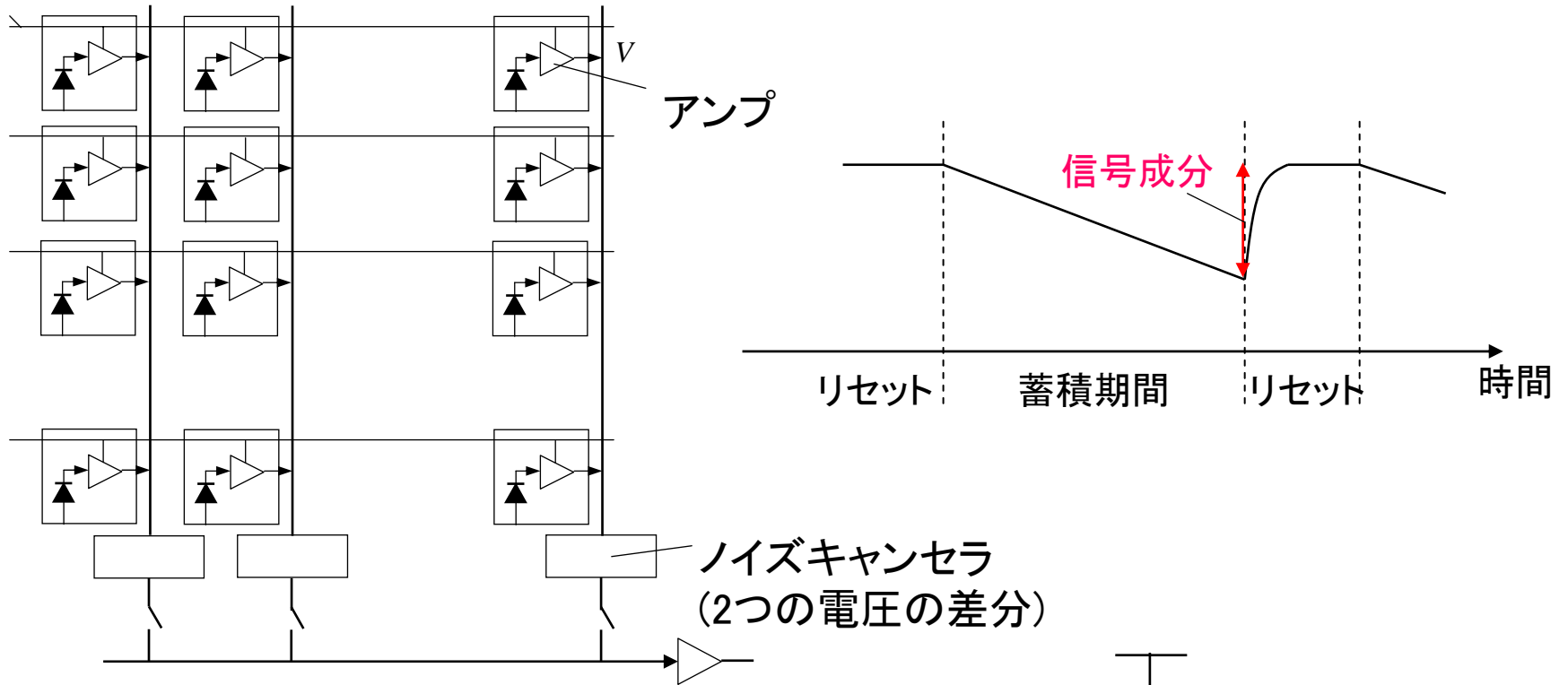
アンプの熱ノイズ

ショットノイズ

暗電流



CMOSイメージセンサのノイズ対策



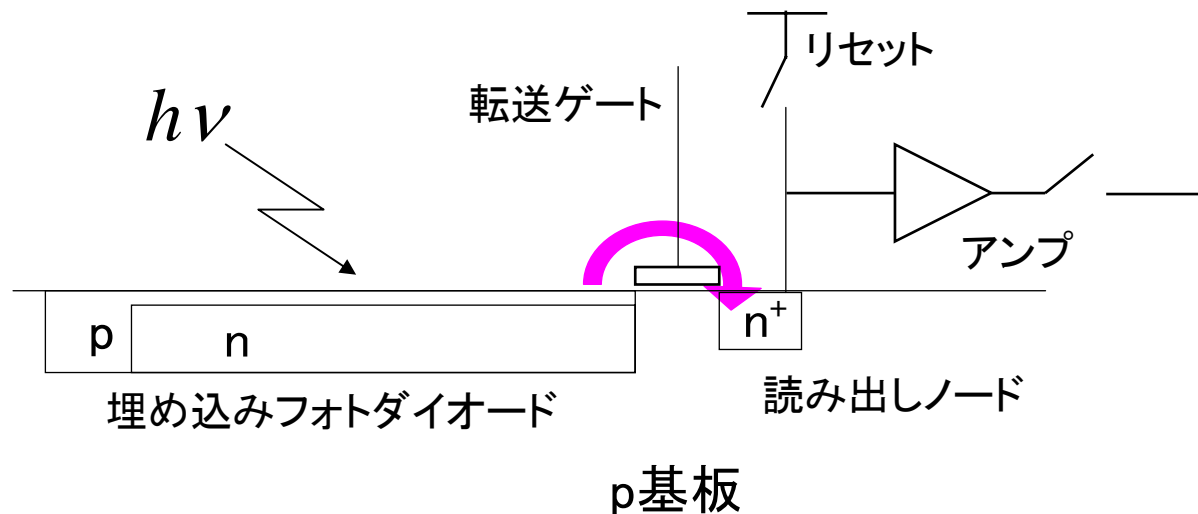
画素固定パターンノイズは除去可能
リセットノイズはこれでは除去できない
(次のフレームのリセットと差分を取っているから)

埋め込みフォトダイオード

- リセットノイズ除去可能
 - 読み出しノードをリセットして, 電圧を読み出す.
 - 転送ゲートを開いて信号電荷を転送
 - 電圧を読み出して, 差分を取る
- 暗電流が少ない
- 製造プロセスがやや特殊になる

(各社で呼び方が違う)

- Hole Accumulated Diode
- Pinned Photodiode



ダイナミックレンジ

定義: 検出できる最も明るい信号の, 最も暗い信号に対する比

$$DR [dB] = 20 \log \frac{i_{\text{upper_limit}}}{i_{\text{lower_limit}}}$$

- 容量を充電し切ってしまう(飽和してしまう)ところで明るいほうの限界が生じる
- 暗いほうの限界はノイズで決まる

- 大きな容量を使う(限界あり)
- 複数回サンプリングして合成
- 飽和検出(時間, 回数)
- 対数圧縮素子
- ポテンシャル井戸の開閉制御

...



シャープ(株)の広ダイナミックレンジイメージセンサの出力画像

Photo. from [nikkeibp]

空間解像度

最近は、売れるための最重要条件らしい

製造プロセスが進むとともに、画素サイズもどんどん小さくなっている

ダイナミックレンジに不安（蓄積容量が小さくなる）

CMOSの場合、回路量も減らす必要が出てきた。画素間で回路を共有する技術が数年前から注目されている

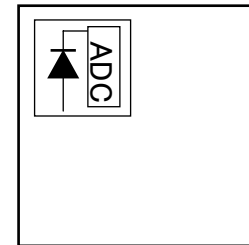
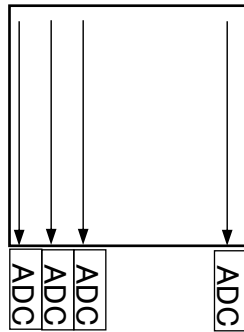
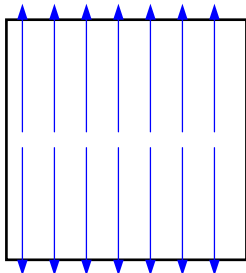
解像度が細かくなると、レンズ系の設計も難しくなる点に注意（ひと昔前は $4\mu\text{m}$ が限界と言われていたが、あっさりその先に進んでいる）

速度

従来のビデオレート(30Hz/60Hz)を超える高速な画像出力の必要性が認識され始めてきた

- 並列同時読み出し
- 列並列 A-D 変換器 (ADC)
- 画素レベル ADC

数百 × 数百画素で 1000 ~ 10000 フレーム毎秒の物も出始めている



機能集積 CMOS イメージセンサ

周辺機能のオンチップ化 → カメラ・オン・チップ

- 制御信号生成, 電源生成
- ADC
- ゲイン制御
- 色補正, ガンマ補正

画像処理機能の追加

- 列レベル/画素レベル
- 前処理
- 特徴抽出
- 画像圧縮・動画圧縮

一般に, 画素レベルで何らかの処理を付加したイメージセンサを「ビジョンチップ」「コンピューショナルセンサ」などと呼ぶ

References

- [米本2003] 米本 和也: CCD/CMOSイメージ・センサの基礎と応用, CQ出版社, 2003.
- [Wong1999] H-S. P. Wong and A. El Gamal, Single-Chip CMOS Imaging Systems (Imagers), 1999 ISSCC Tutorial, 1999.
- [impress] <http://www.watch.impress.co.jp/pc/docs/article/990820/sanyo.htm>
- [nikkeibp] <http://ne.nikkeibp.co.jp/device/2003/04/1000018072.html>