

---

知能制御システム学

カメラとイメージセンサの基礎

東北大学 大学院情報科学研究科

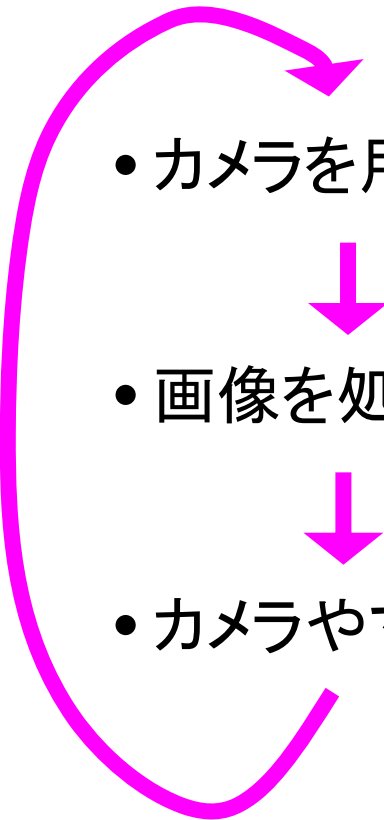
鏡 慎吾

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

2008.06.17

# 「知能制御システム学」後半の目的

前半で学んだビジュアルサーボシステムを実現するための要素技術について可能な限り実践的に学ぶ



- カメラを用いて画像を得る

↓

- 画像を処理して対象を抽出・追跡する

↓

- カメラやマニピュレータの運動を計算し、制御する(既習)

# 予定

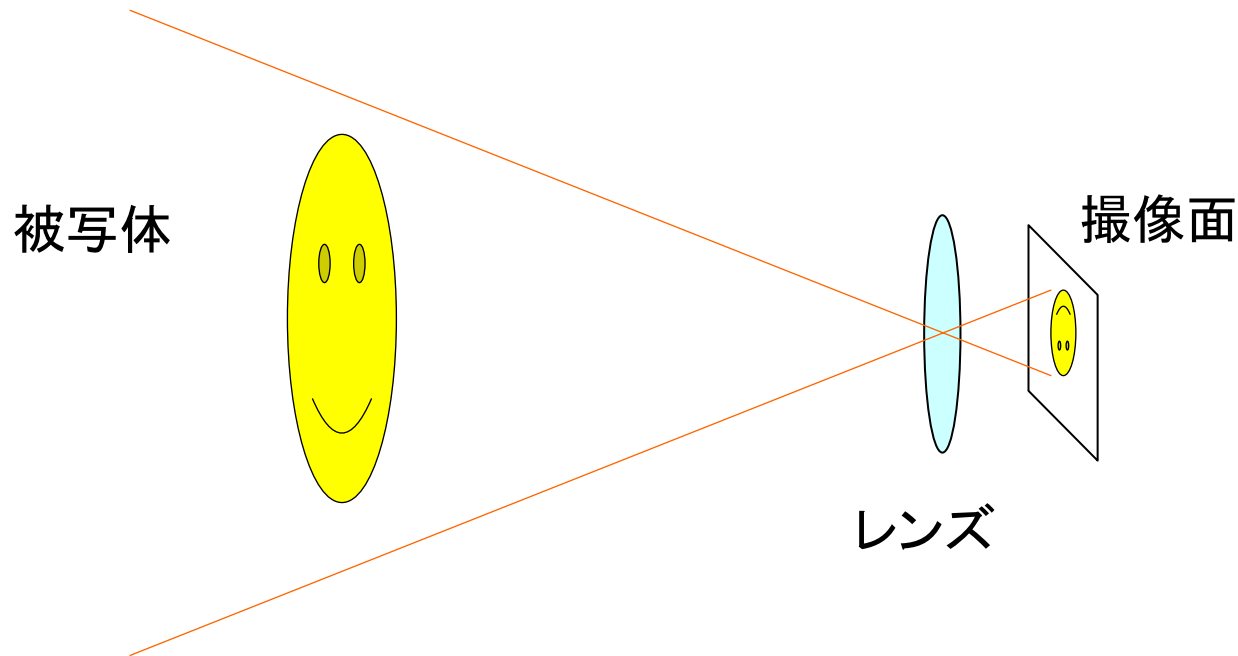
- 2008.06.17 カメラ・イメージセンサの基礎
- 2008.06.24 画像処理 (1) 準備編
- 2008.07.01 画像処理 (2) 基礎編
- 2008.07.08 画像追跡 (1)
- 2008.07.15 画像追跡 (2)
- 2008.07.22 画像処理の高速化

# 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」であるカメラ及びイメージセンサ技術の基礎を学ぶ
- カメラ光学系の基本を理解する
- 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] [Ohta 2008] [Hecht 2002] [Hornberg 2006]

# 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

# カメラの例

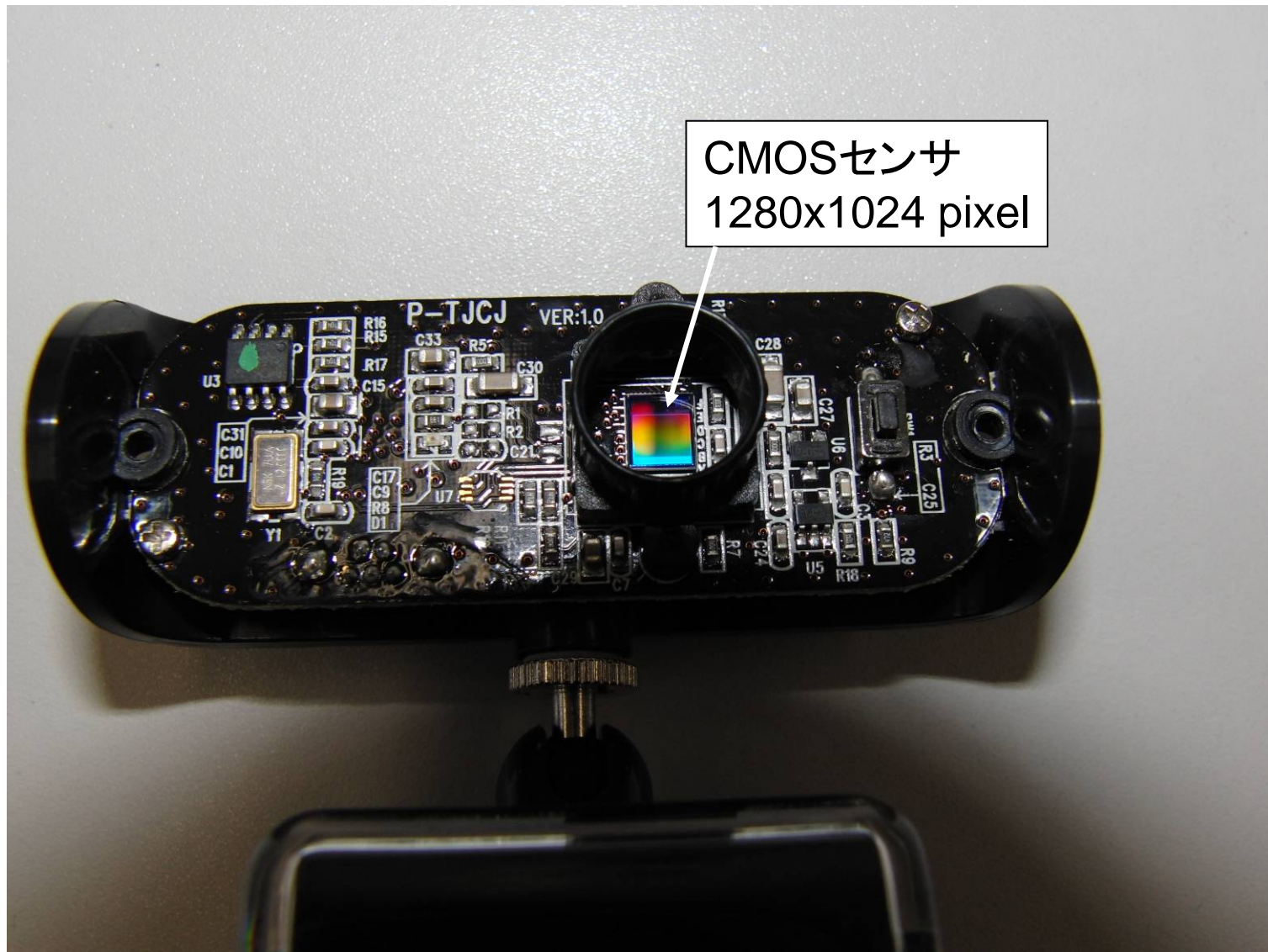


ELECOM  
UCAM-DLM130HSV

# カメラの例



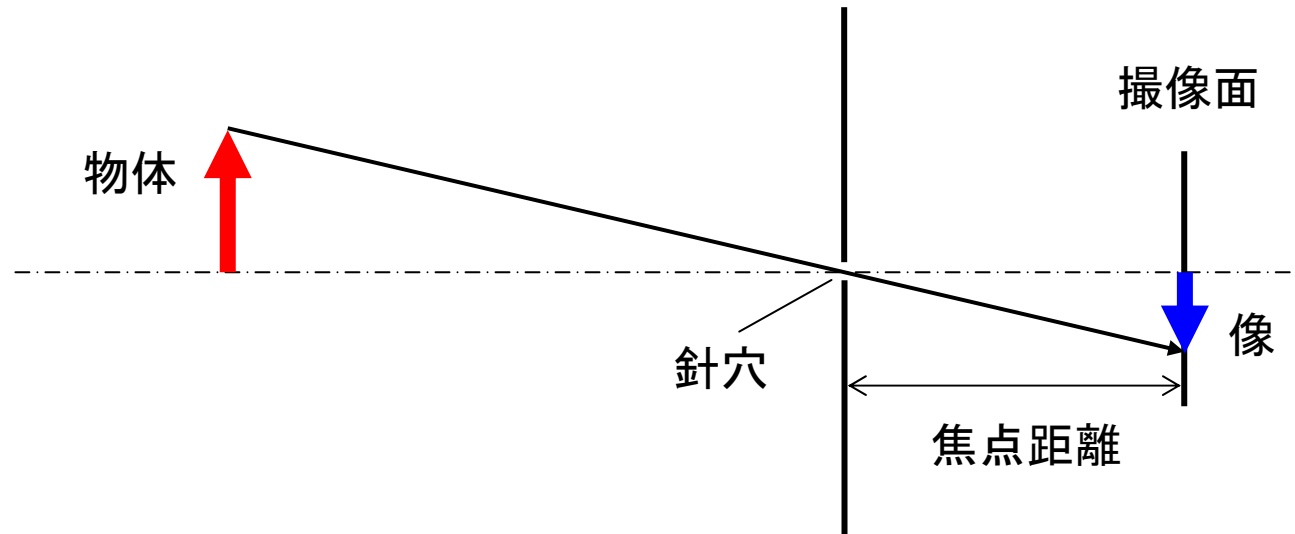
# カメラの例



CMOSセンサ  
1280x1024 pixel

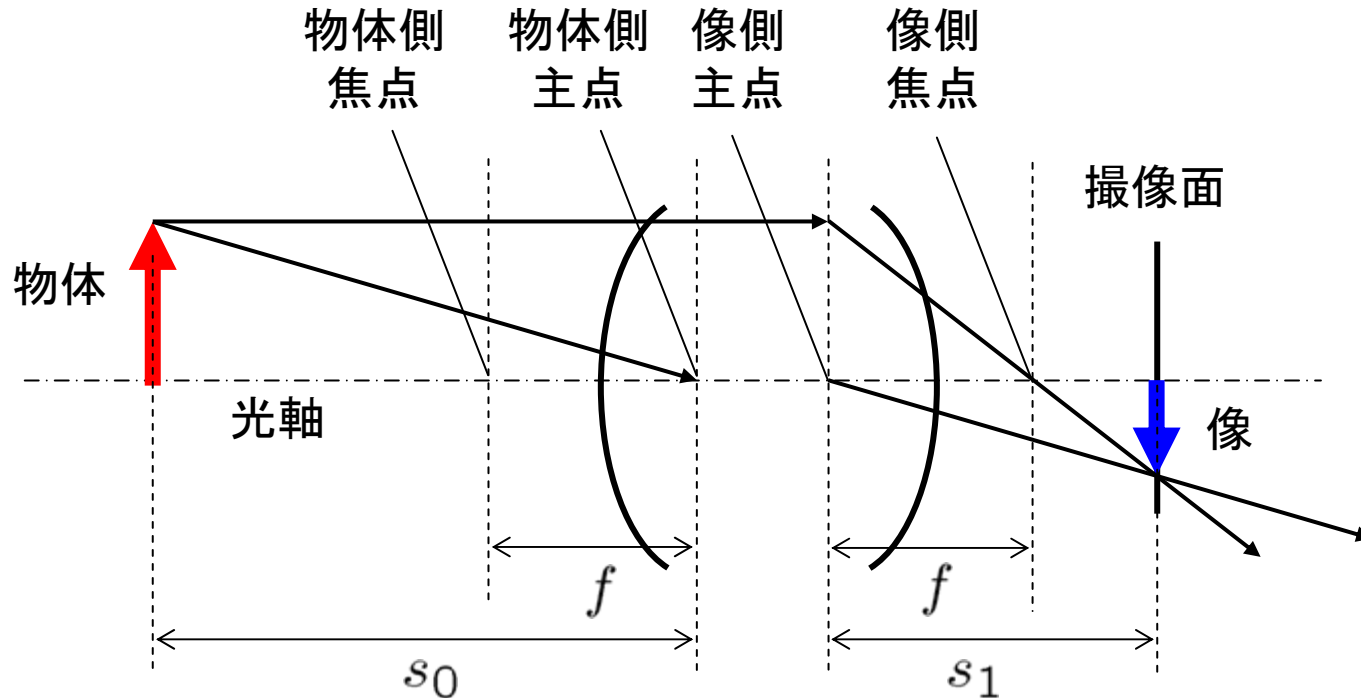


# ピンホールカメラ



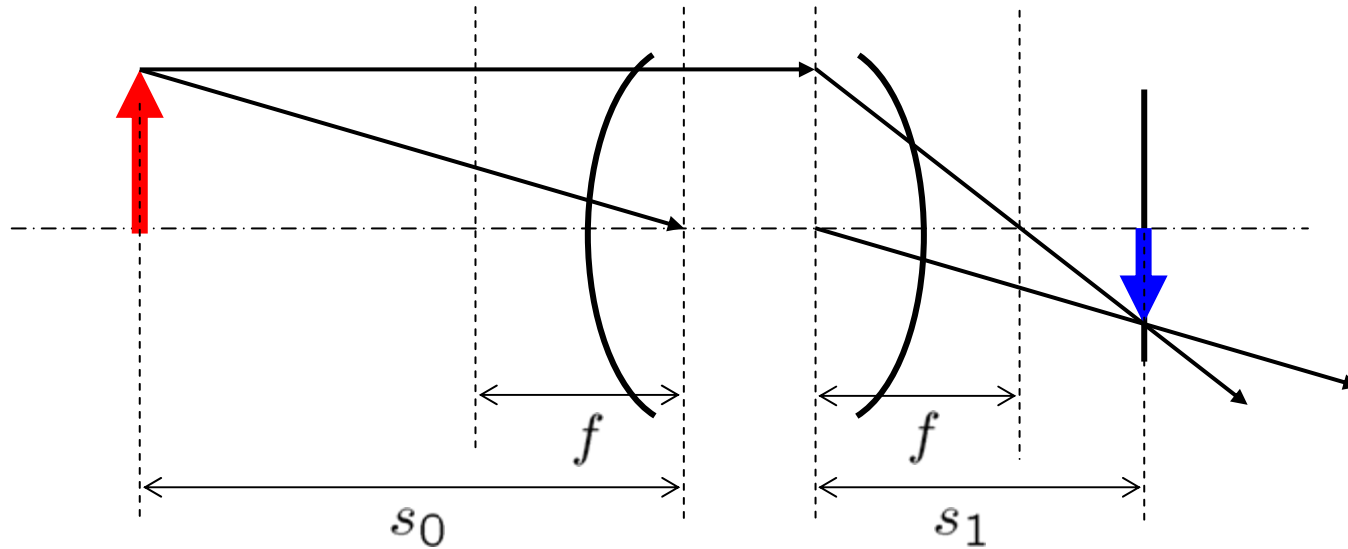
- 基本はピンホールカメラである.
- 撮像面のある一点に当たる光は, その点とピンホールを結ぶ直線上のどこかから発せられたものである.
- 被写体までの距離は理論上無制限
- ピンホールを通らない光は無駄 → 光量を稼げない

# カメラレンズ



- 適当な仮定のもとで、レンズ系全体は4つの主要点により特徴付けられる
- 物体側から光軸に平行に入射した光線は、像側主平面の同じ高さの点と像側焦点を通る
- 物体側から物体側主点にある角度で入射した光線は、像側主点から同じ角度で現れる

# レンズの公式



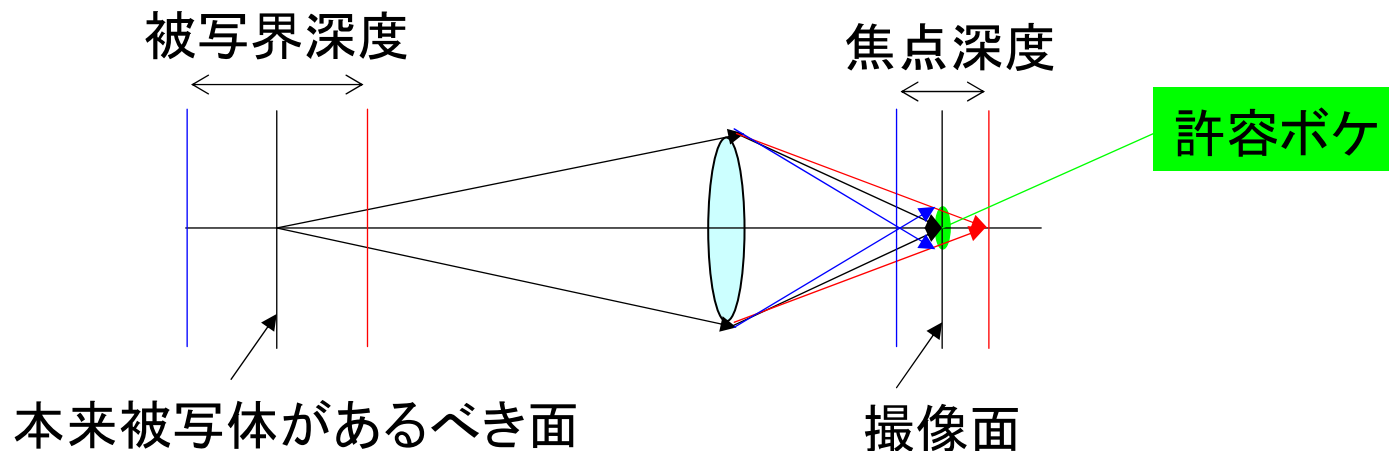
焦点距離  $f$  のレンズで、距離  $s_1$  の位置に撮像面があるとすると、距離  $s_0$  の位置にある被写体だけが距離  $s_1$  の面に結像する。  
ただし  $s_0$  は以下で与えられる:

$$1/f = 1/s_0 + 1/s_1$$

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。**

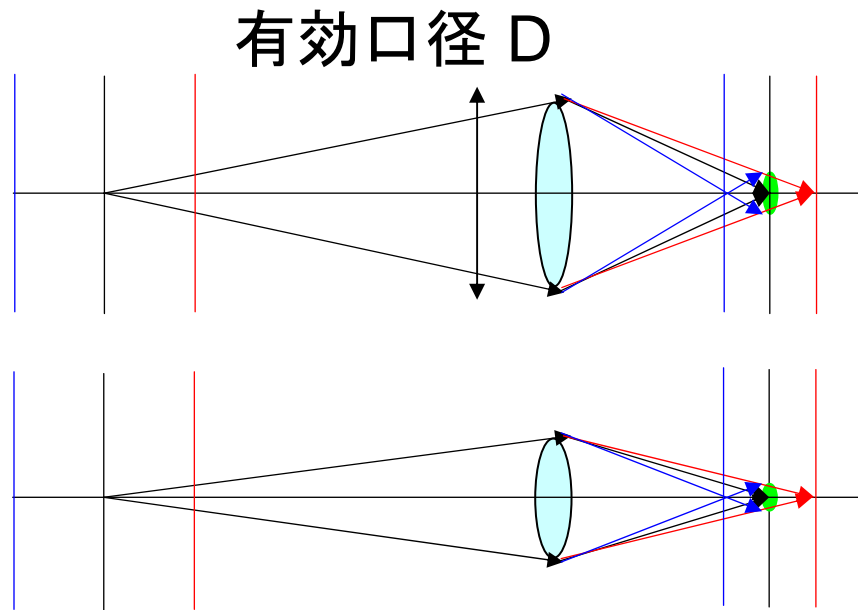
# 被写界深度

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).

# 口径しぼりと被写界深度



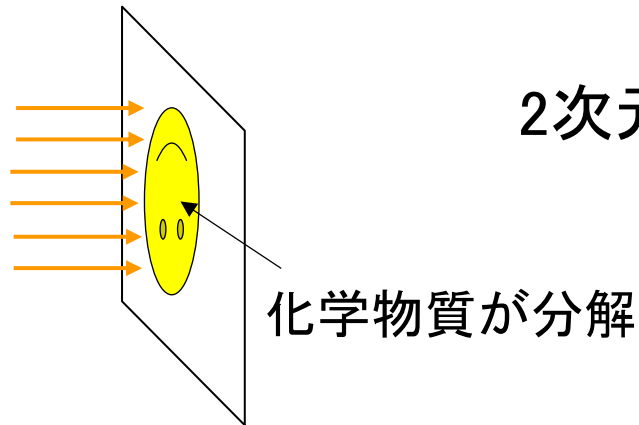
$$F\text{値} = f / D$$

F値が小さいほど  
明るいけど、その分  
被写界深度が浅くなる

- 焦点距離が同じで、レンズの有効口径のみが違う2組のレンズを考える
- 物体上のある点から出た光線束はレンズ口径を底面とする(斜)円錐をなしながら撮像面と交わる
- ピントが完全に合っている場合、円錐の頂点は撮像面上にある
- ピントが完全に合っていない場合、撮像面による円錐の断面積がボケに相当
- レンズ口径が小さい方が断面積が小さいので、ボケも小さい

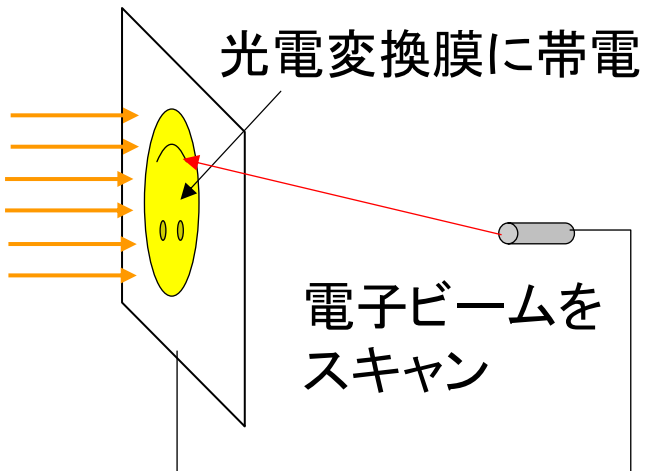
# 撮像

2次元の面上に照射される光の強さを測りたい



化学物質が分解

- ・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



光電変換膜に帯電

電子ビームを  
スキャン

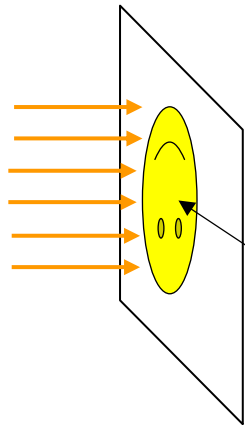
信号電流

- ・銀塩カメラ: 光エネルギーでハロゲン化銀を分解



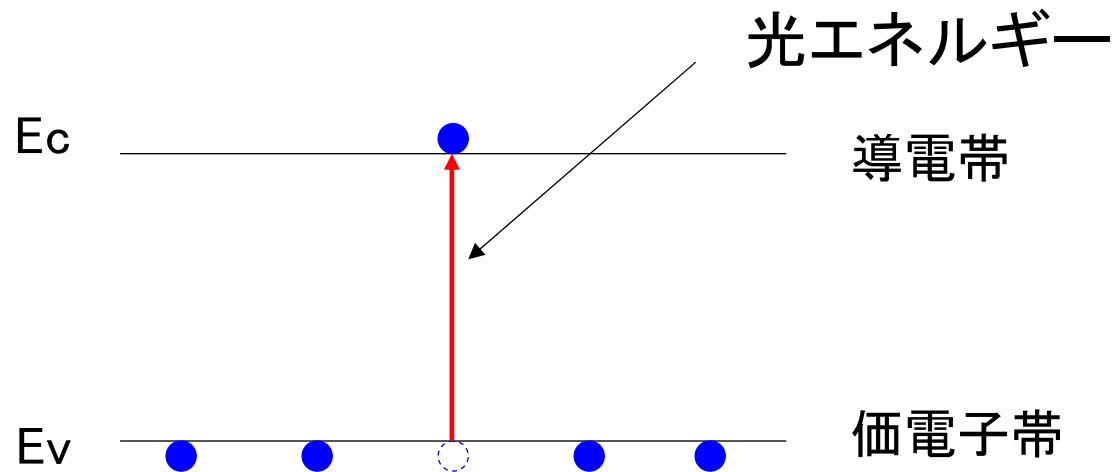
- ・撮像管: 光エネルギーで電荷が発生し, それを電子ビームの走査で順に信号電流として読み出す

# 固体撮像素子



電子が発生

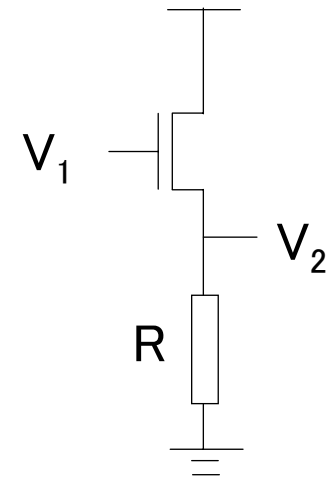
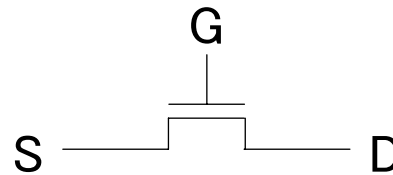
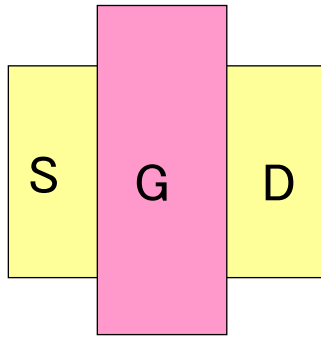
光エネルギーによってシリコン内部の電子が励起し、  
信号として取り出せる状態になる（内部光電効果）



# 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

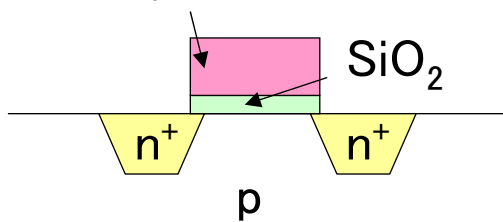
上面から見たところ



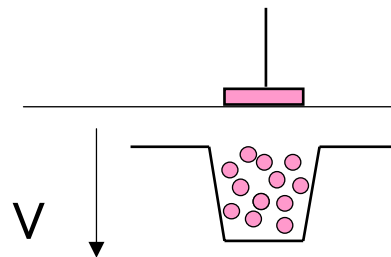
- Gに電圧をかけると S と D の間に電流を流せるようになる (= MOS スイッチ)

- $V_2 = V_1 + \alpha$   
(ソースフォロワアンプ)

PolySi



断面から見たところ

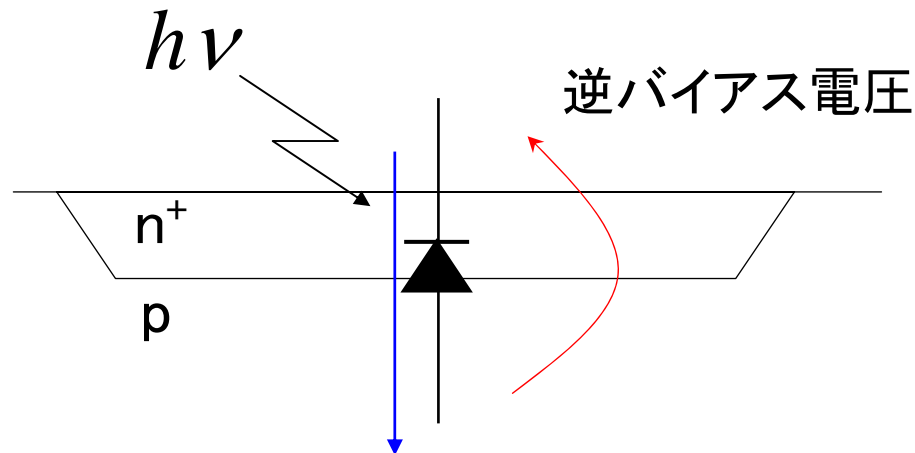


- 局所的に電位の高い場所を作ると、そこに電子をためたりできる



# 光電変換（フォトダイオード）

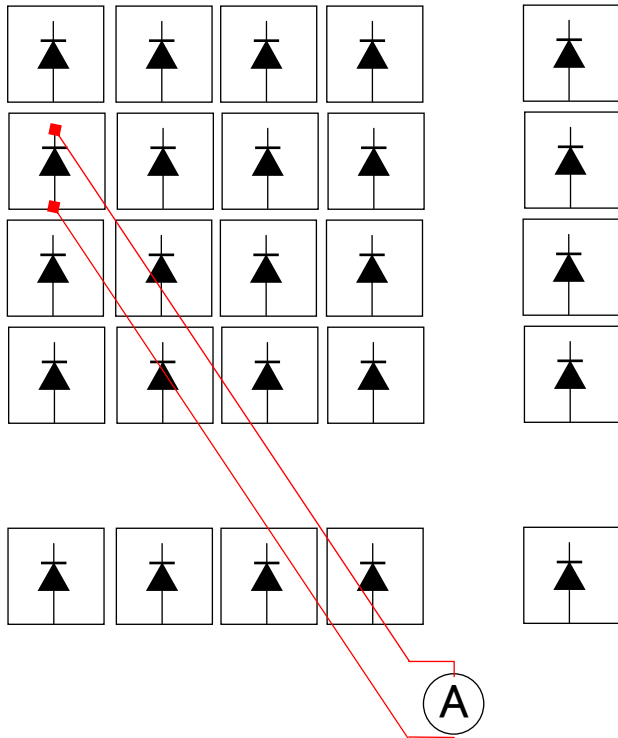
フォトダイオードと呼ばれる構造を用いることが多い



$i$  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)

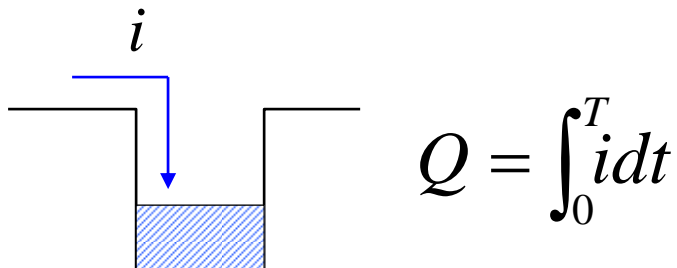
- 光通信用のフォトダイオードなどでは、この光電流を増幅して信号検出に利用する。
- イメージセンサでは、これを画素でいったん蓄積することが多い

# 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

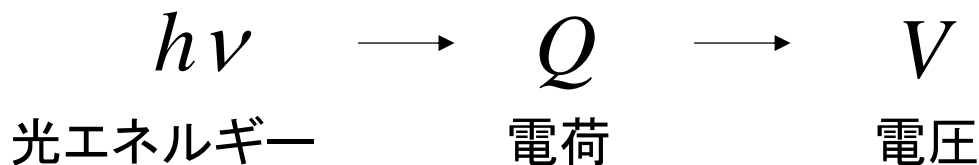
× CCDというのは光検出素子の種類である

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



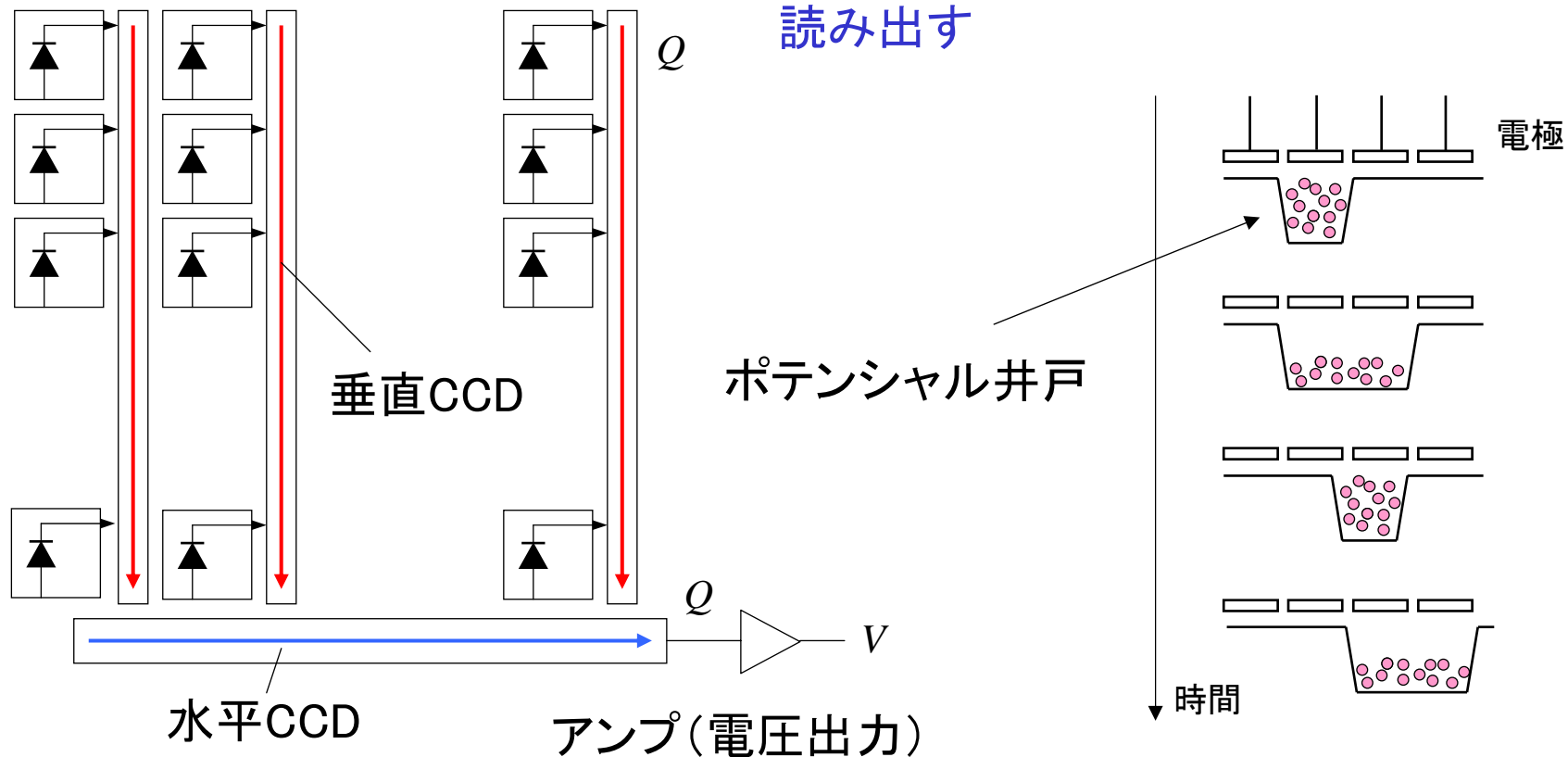
ここまでを画素で行うのがCCD (電圧への変換は画素アレイの外)

ここまでを画素で行うのがCMOS

# CCD の場合

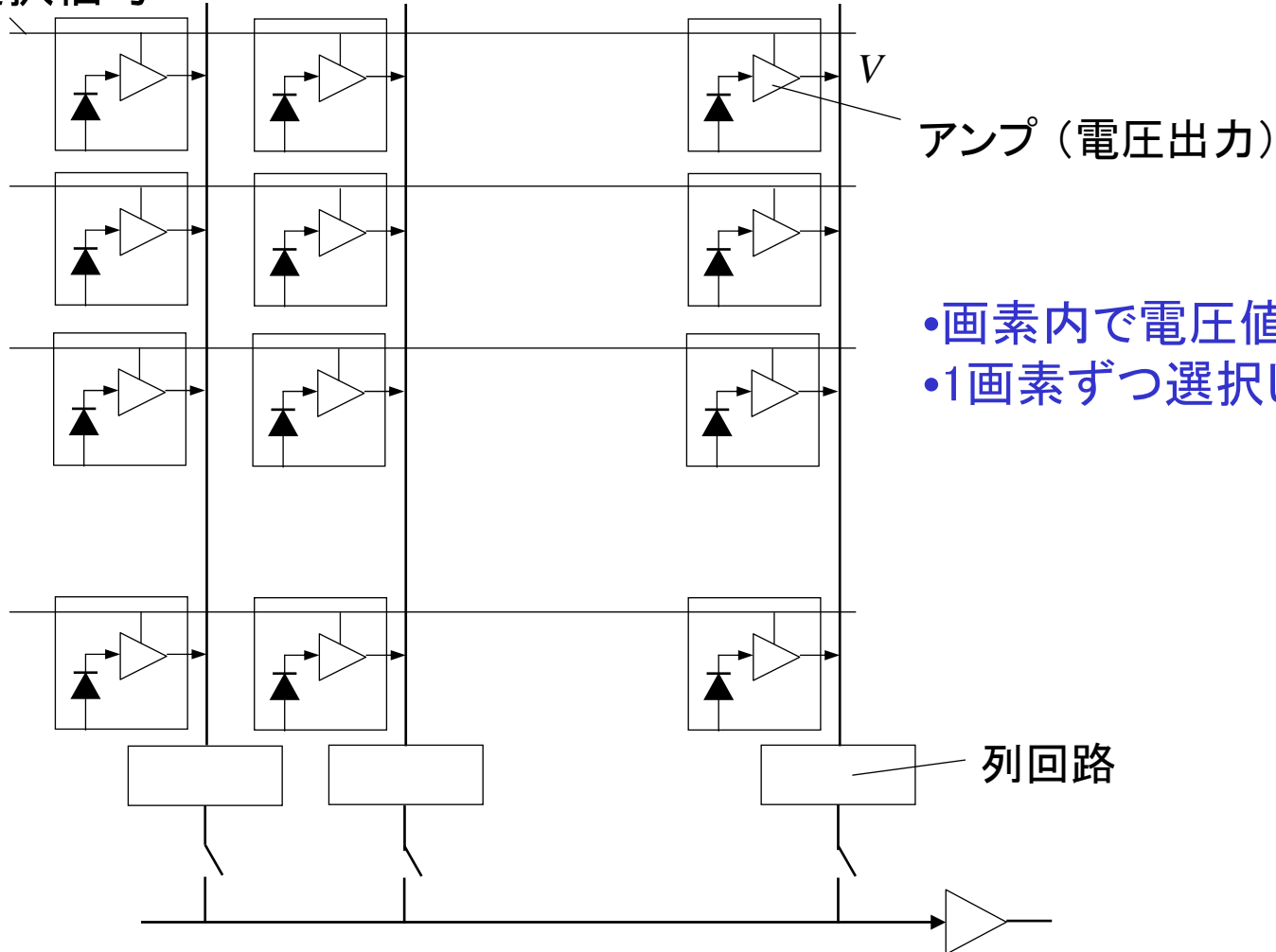
(インターライン転送型 CCD)

- 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



# CMOS の場合

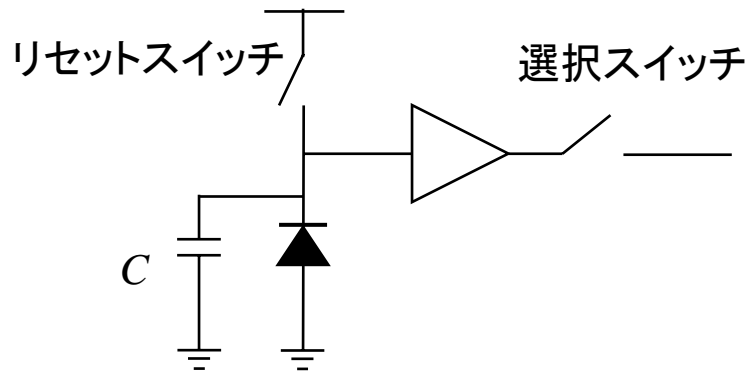
行選択信号



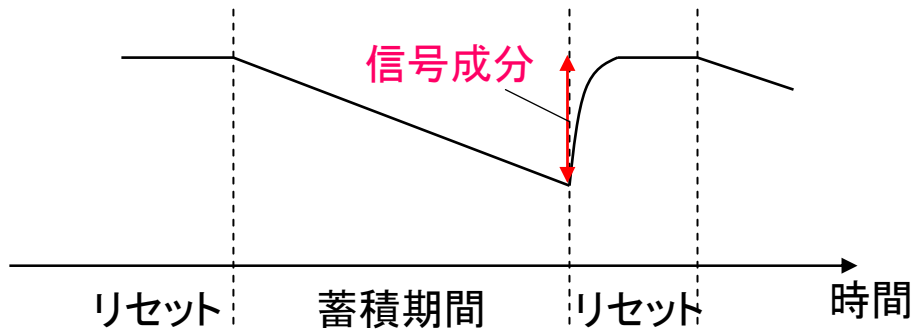
- 画素内で電圧値に変換
- 1画素ずつ選択して読み出す

CMOS アクティブピクセルセンサ (APS)

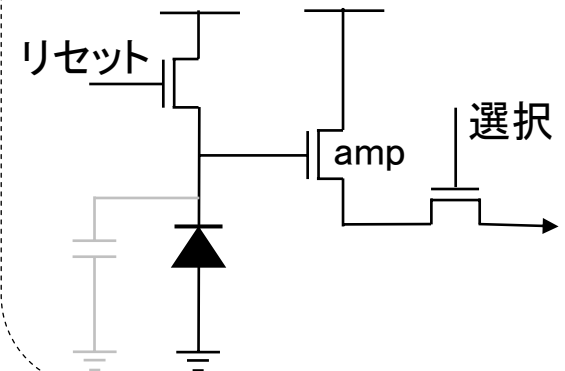
# CMOS APS の画素構成



- 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)



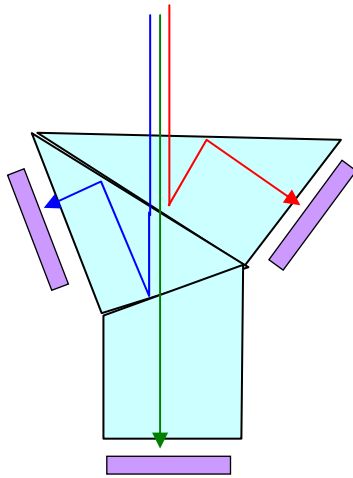
(詳細回路)  
3トランジスタ APS



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ラビリティなどで有利

# カラー化

## 3板式

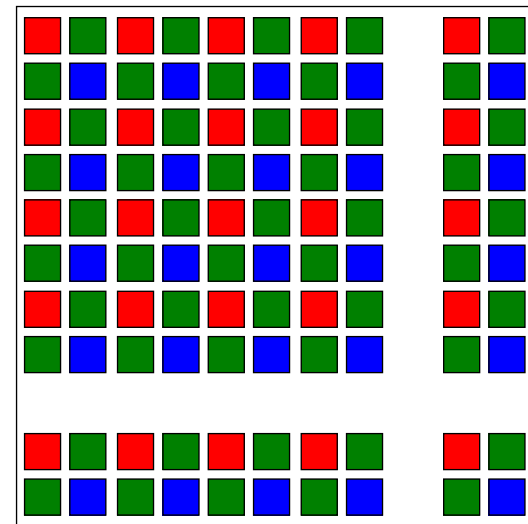


イメージセンサ x 3

プリズムで光を RGB にわける  
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



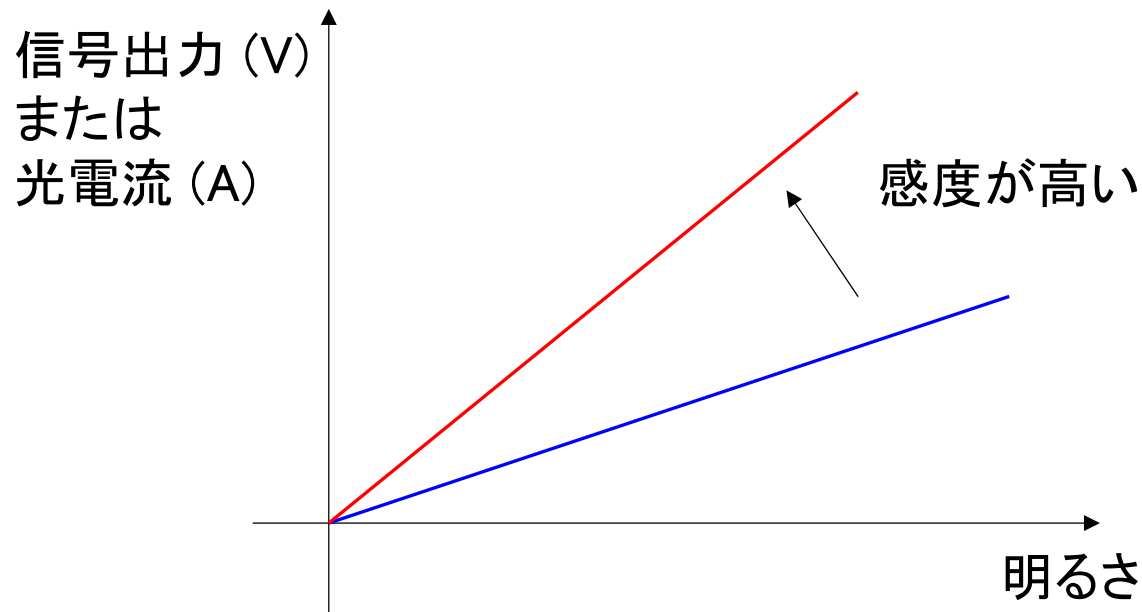
# イメージセンサの性能

- 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<sup>2</sup>]

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<sup>2</sup>]

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·s]

光束 [lm]

照度 [lx]

光度 [cd]

輝度 [cd/m<sup>2</sup>]

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)

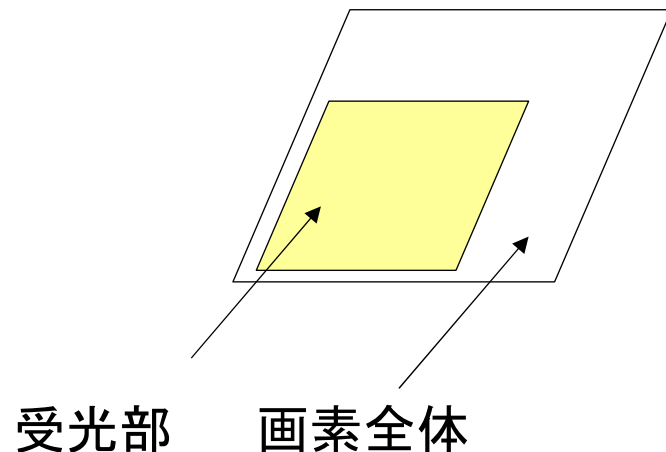
受光部の面積 / 画素の面積

## ・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

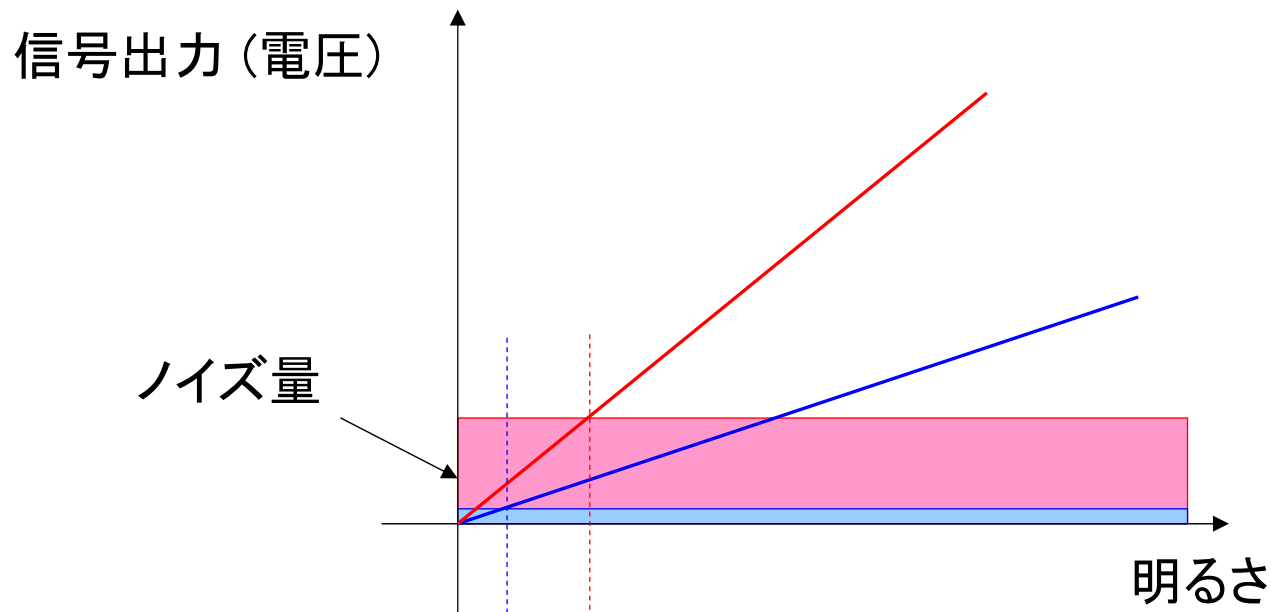
$V = Q / C$  なので小さい容量で変換  
するのが重要



# 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, 画素ごとにはばらついたり, 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

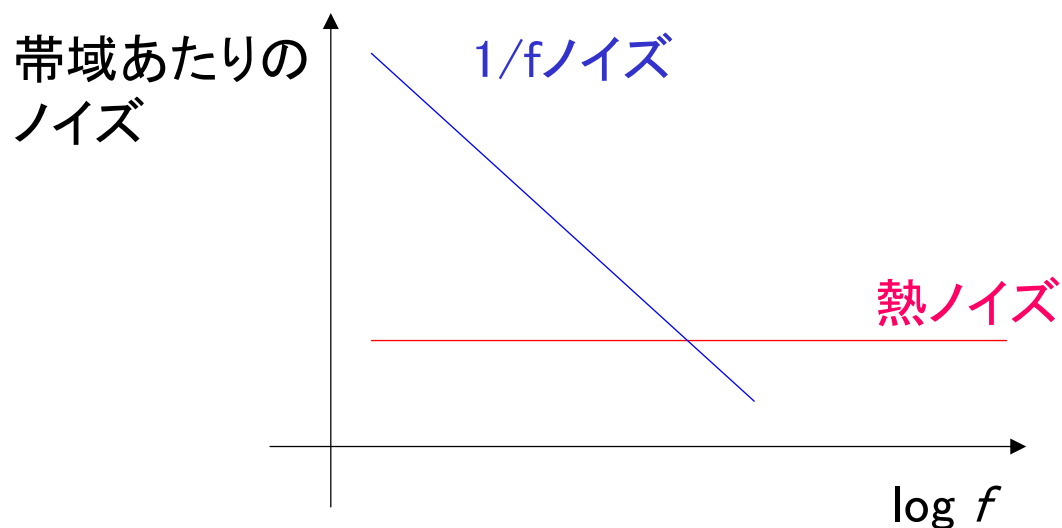
- リセットノイズ (kTCノイズ)

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)

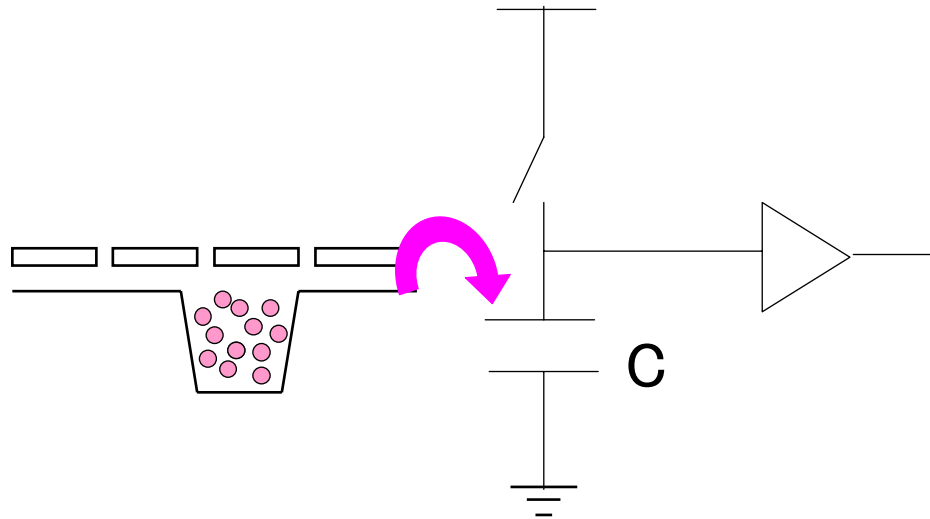
- アンプの  $1/f$  ノイズ

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



# 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

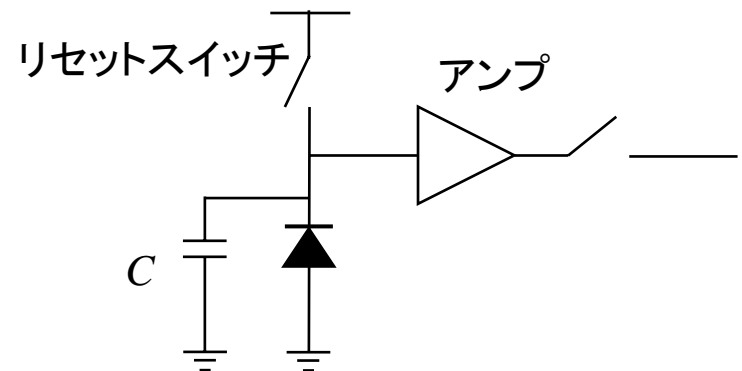
リセットノイズ

1/f ノイズ

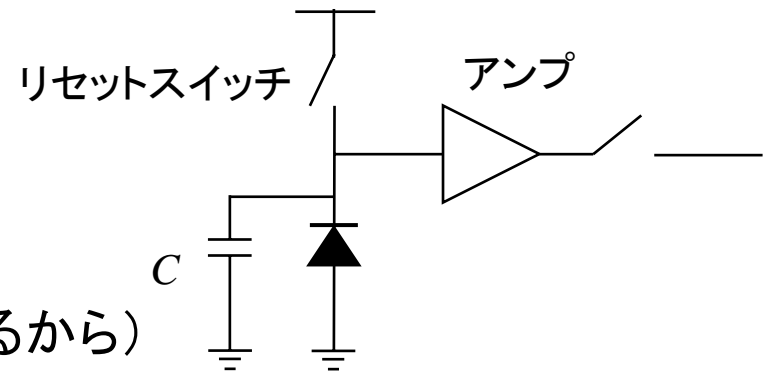
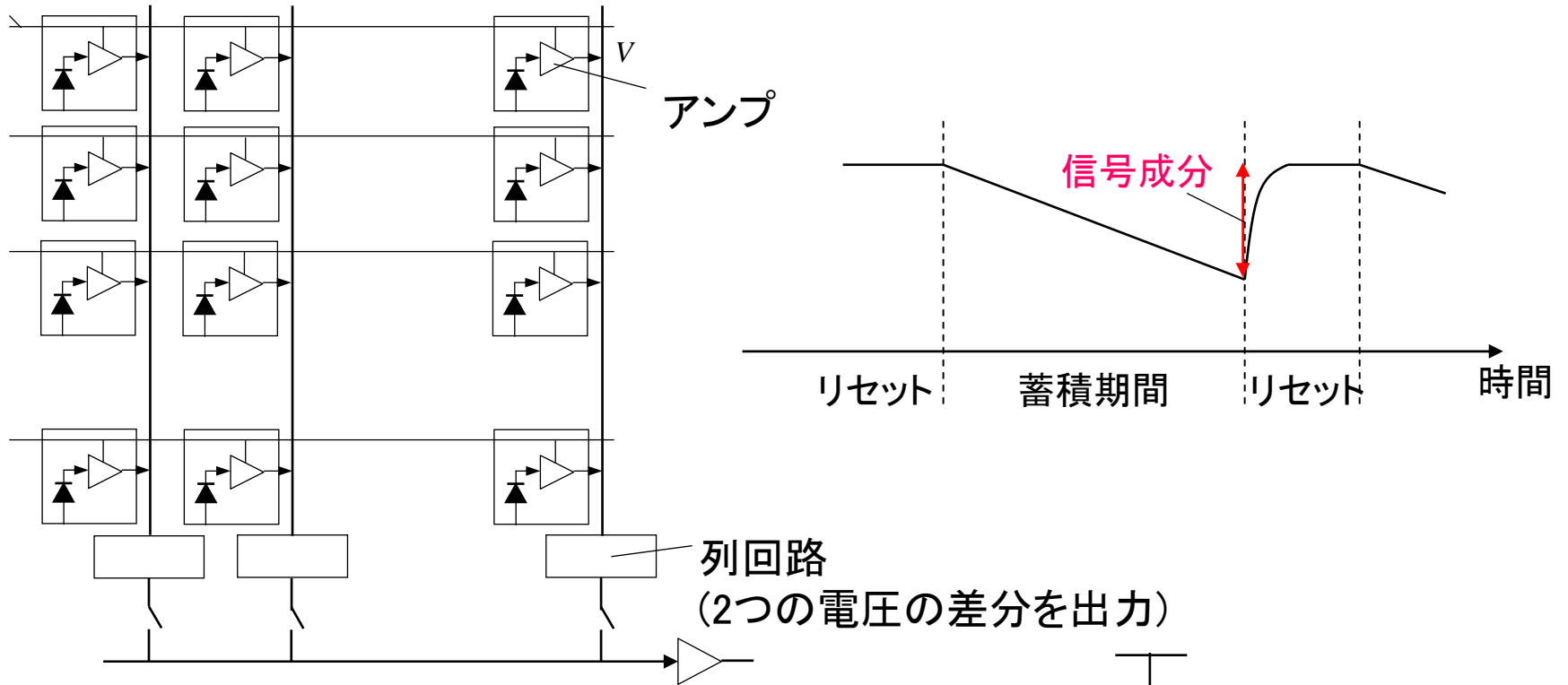
アンプの熱ノイズ

ショットノイズ

暗電流



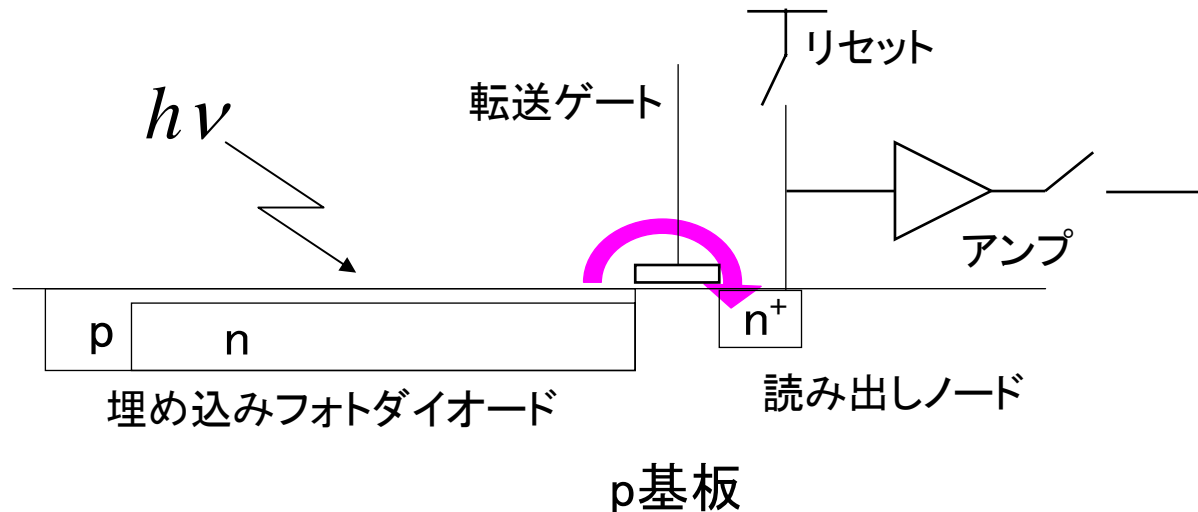
# CMOSイメージセンサのノイズ対策



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
  1. 読み出しノードをリセットして, 電圧を読み出す.
  2. 転送ゲートを開いて信号電荷を転送
  3. 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



# 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 [ascii24 2003]

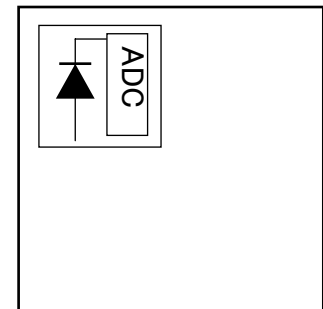
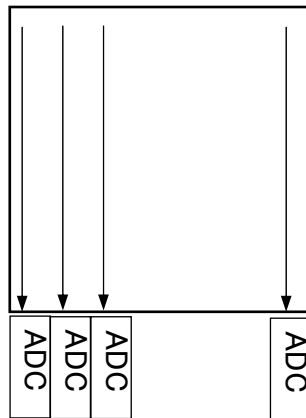
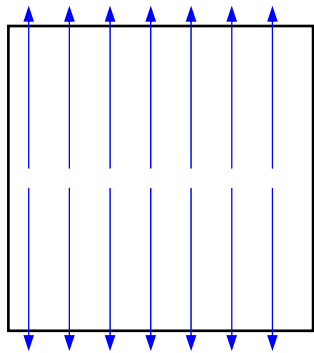
# 空間解像度

- 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

- 高速読み出し
- 並列同時読み出し
- 並列 A-D 変換
- 部分読み出し





# 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.
- [Ohta 2008] Jun Ohta: Smart CMOS Image Sensors and Applications, CRC Press, 2008.
- [Hecht 2002] Eugene Hecht: Optics, Pearson Education, 2002. (尾崎, 朝倉訳: ヘクト光学I, 丸善, 2002)
- [Hornberg 2006] Alexander Hornberg ed.: Handbook of Machine Vision, Wiley-VCH, 2006.
- [ascii24 2003] <http://ascii24.com/news/i/tech/article/2003/04/14/643040-000.html>  
(as of 2008.06.17)