
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](mailto:swk(at)ic.is.tohoku.ac.jp)

<http://www.ic.is.tohoku.ac.jp/ja/swk/>

2012.06.05

「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(前半)

予定

- 2012.06.05 カメラとイメージセンサの基礎
- 2012.06.12
- 2012.06.19
- 2012.06.26
- 2012.07.03
- 2012.07.10
- 2012.07.17

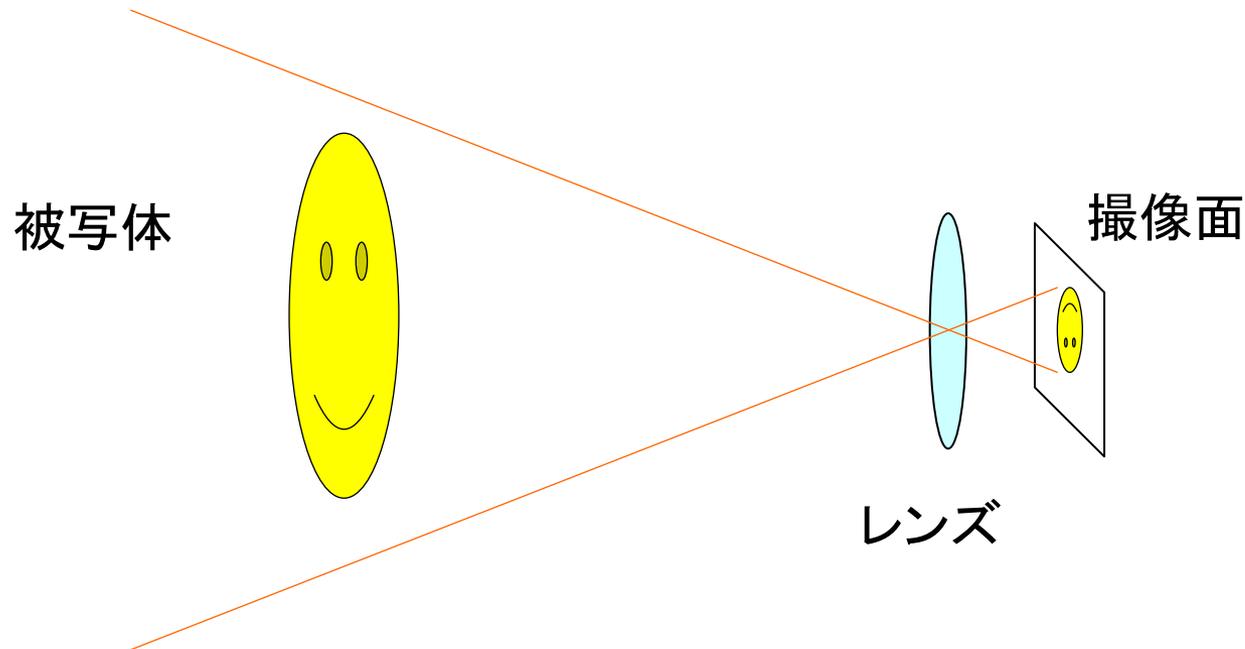
一昨年度(隔年開講)の内容は,

- OpenCVの概要と, 画像処理の基本的な考え方・実例
- 画像追跡の例として, Harrisオペレータ, KLTトラッカ, Mean Shiftトラッカ, カルマンフィルタ, パーティクルフィルタ
- Cプログラミングを前提として, 高速化のための基本事項をいくつか

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

イメージセンサ, カメラ とは



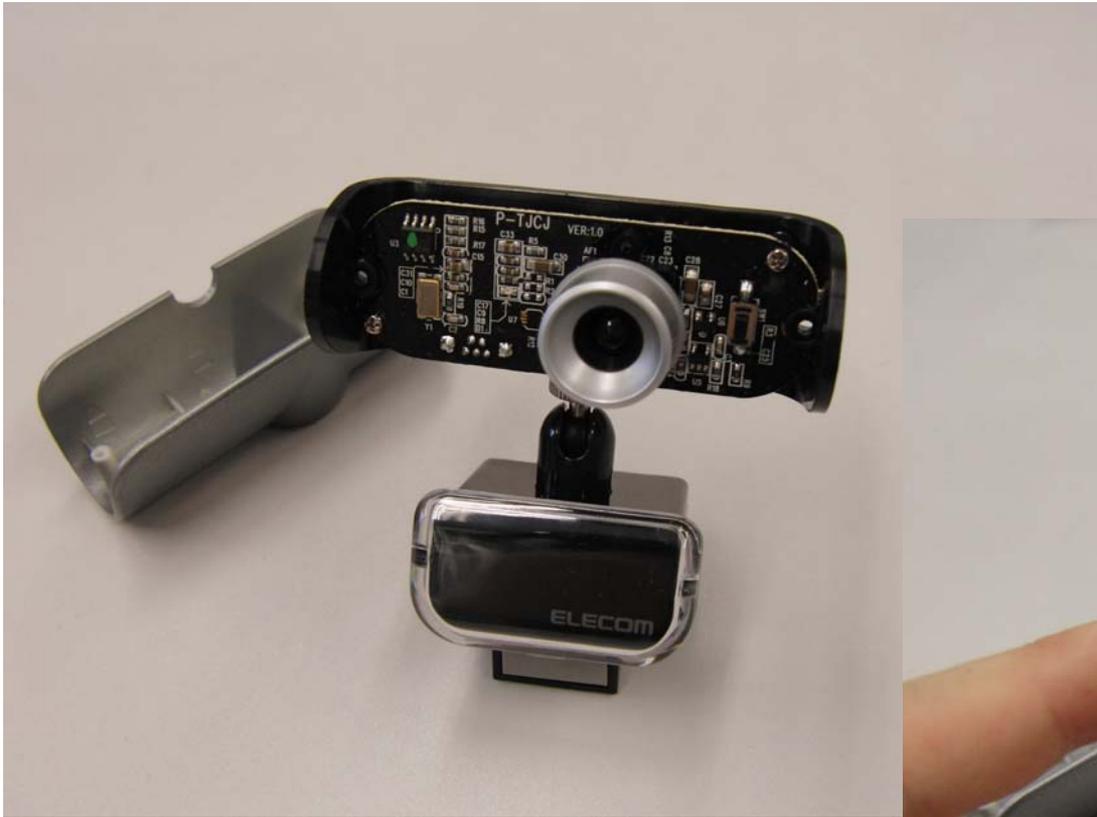
- 被写体から出た光が, レンズを通して撮像面に結像する (3D → 2D)
- 撮像面における明るさの度合い(後でちゃんと定義)を, 何らかの信号として読み出す (2D → 2D). 普通は電気信号.
- レンズ系などを含めた 3D → 2D の変換系全体をカメラと呼ぶことが多い
- 撮像面の 2D光分布 → 信号出力 の部分をイメージセンサと呼ぶことが多い

カメラの例

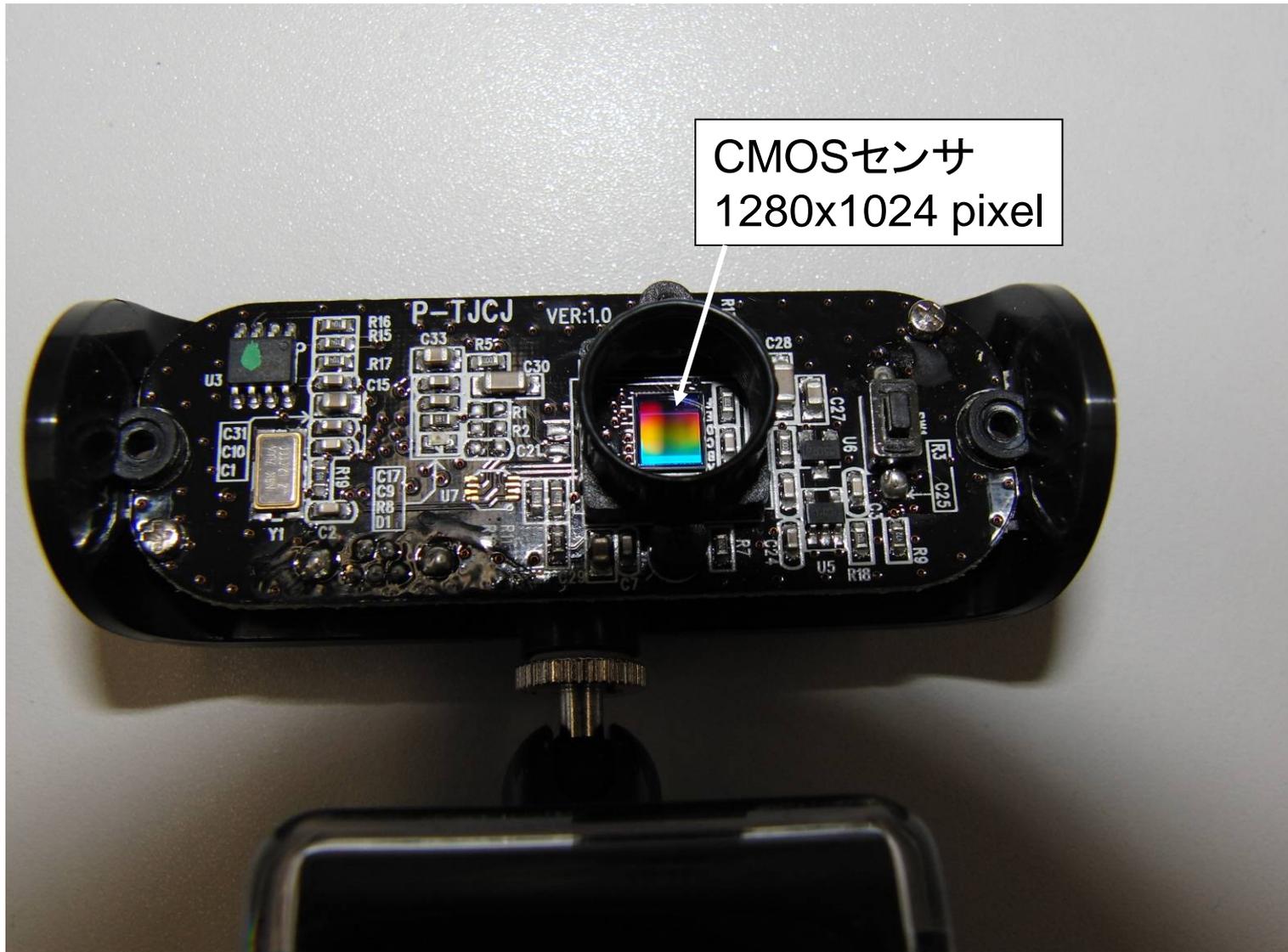


ELECOM
UCAM-DLM130HSV

カメラの例

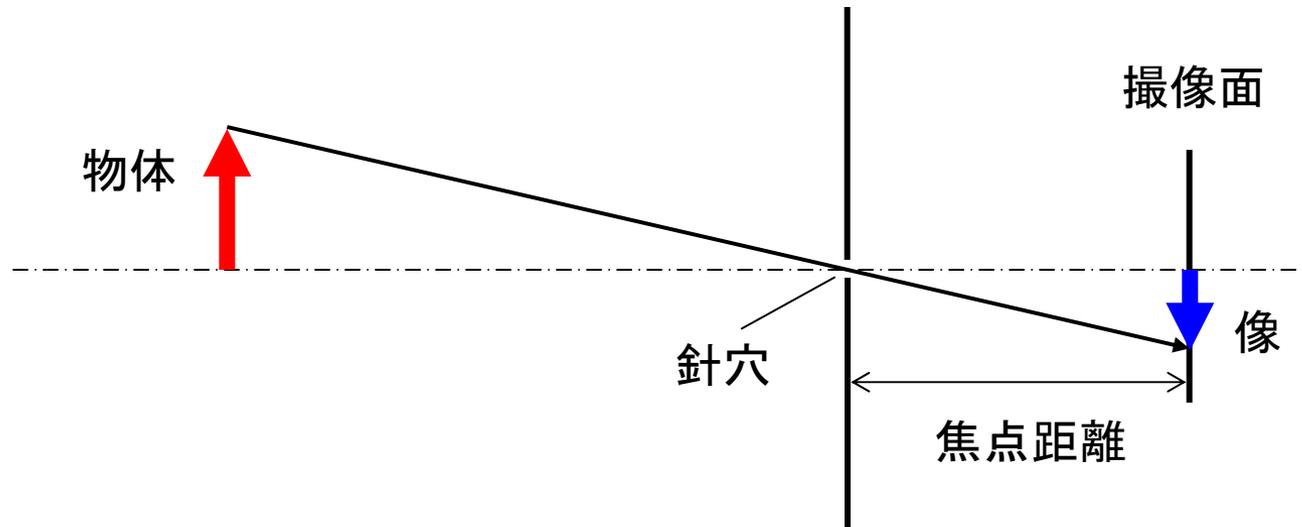


カメラの例



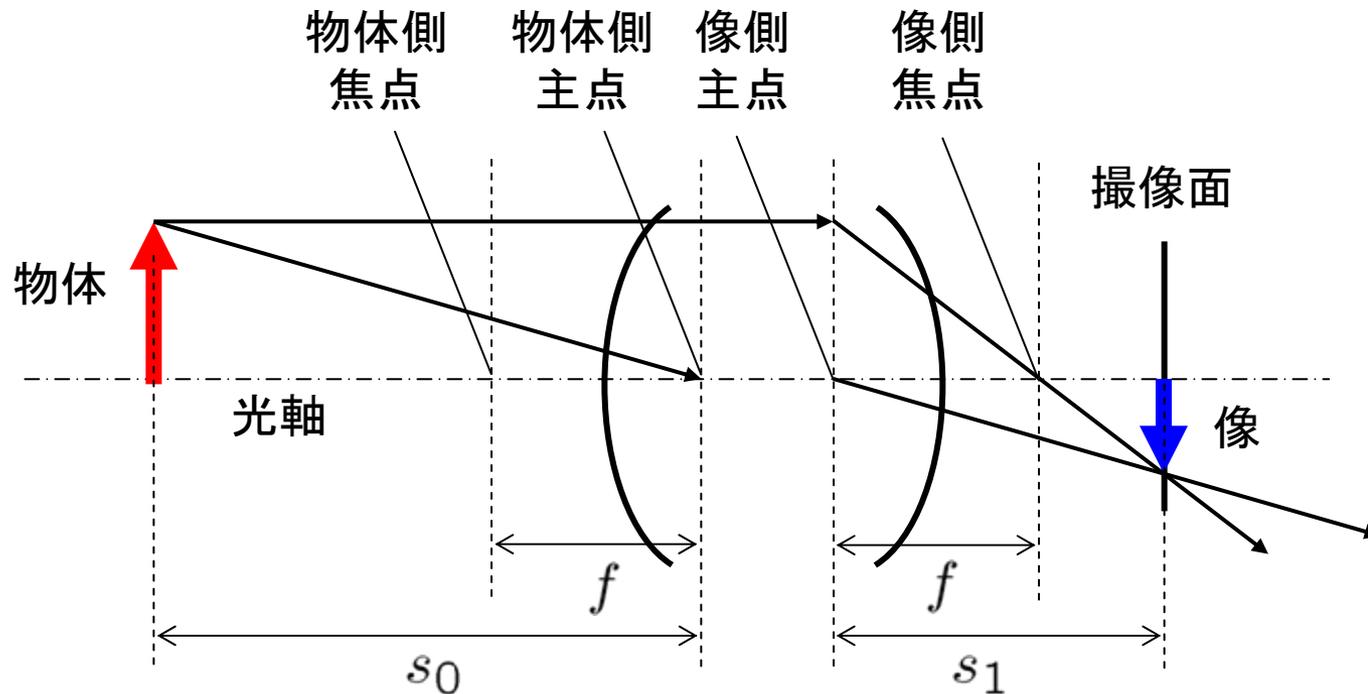
CMOSセンサ
1280x1024 pixel

ピンホールカメラ



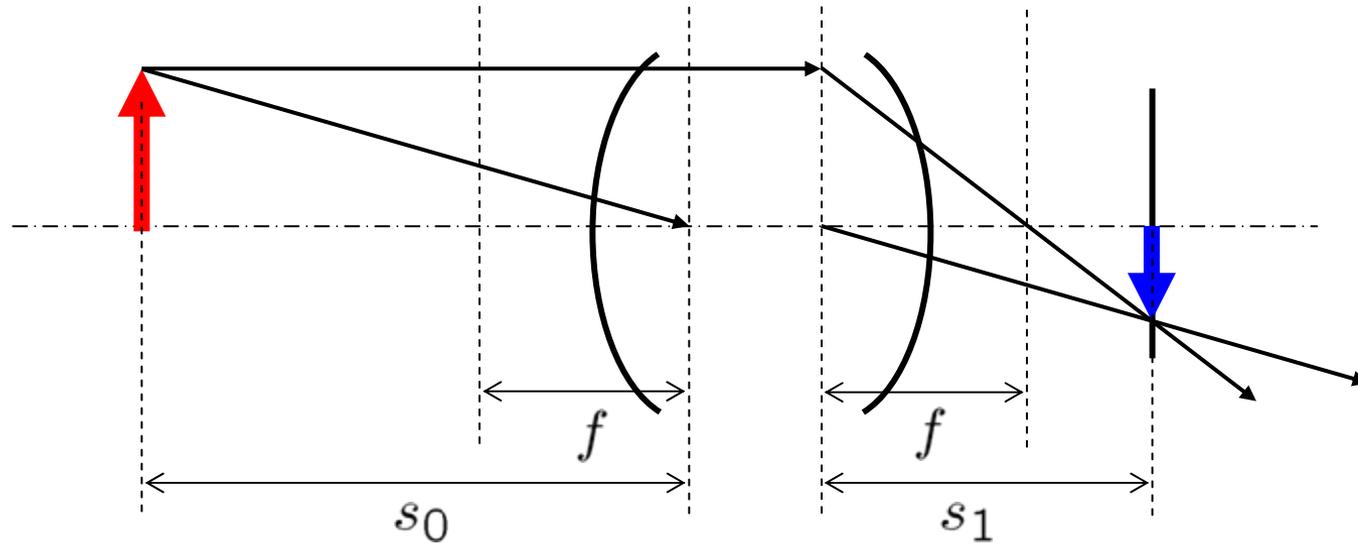
- 基本はピンホールカメラである.
- 撮像面のある一点に当たる光は, その点とピンホールを結ぶ直線上のどこかから発せられたものである.
- 被写体までの距離は理論上無制限
- ピンホールを通らない光は無駄 → 光量を稼げない

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



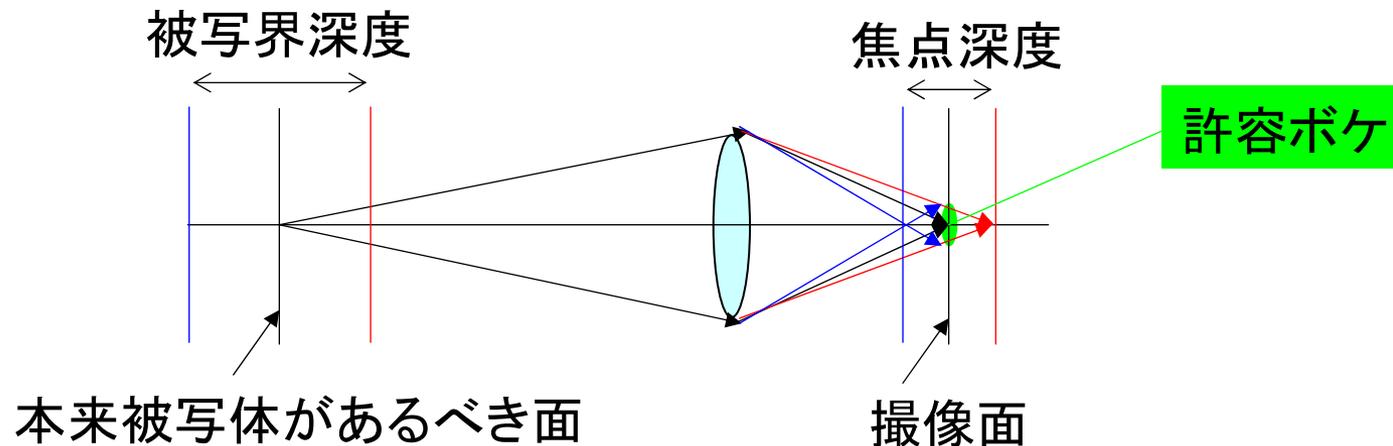
焦点距離 f のレンズで、距離 s_1 の位置に撮像面があるとすると、距離 s_0 の位置にある被写体だけが距離 s_1 の面に結像する。
ただし s_0 は以下で与えられる:

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

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

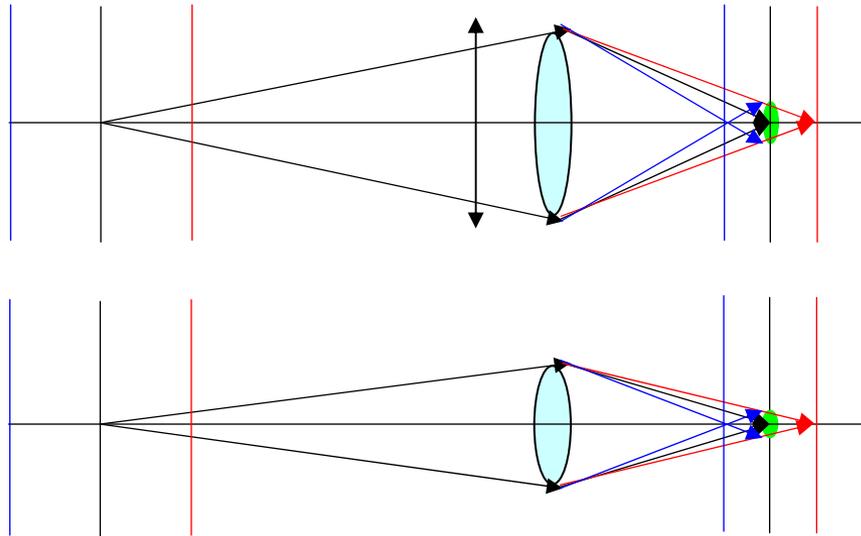
ではある一定の距離にあるぺらぺらのものしか写せないのか?
→ 被写界深度の範囲内ならば大丈夫



- 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

有効口径 D



$$F \text{ 値} = f / D$$

F値が小さいほど
明るい、その分
被写界深度が浅くなる

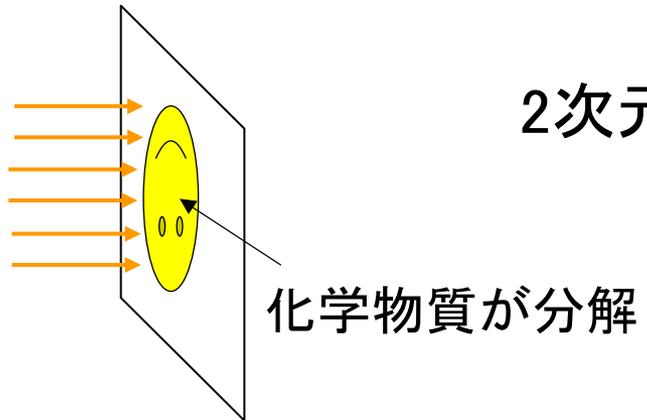
- 焦点距離が同じで、レンズの有効口径のみが違う2組のレンズを考える
- 物体上のある点から出た光線束は有効口径を底面とする(斜)円錐をなしながら撮像面と交わると見なせる
- ピントが完全に合っている場合、円錐の頂点は撮像面上にある
- ピントが完全に合っていない場合、撮像面による円錐の断面積がボケに相当
- レンズ口径が小さい方が断面積が小さいので、ボケも小さい

レンズとカメラの組み合わせ

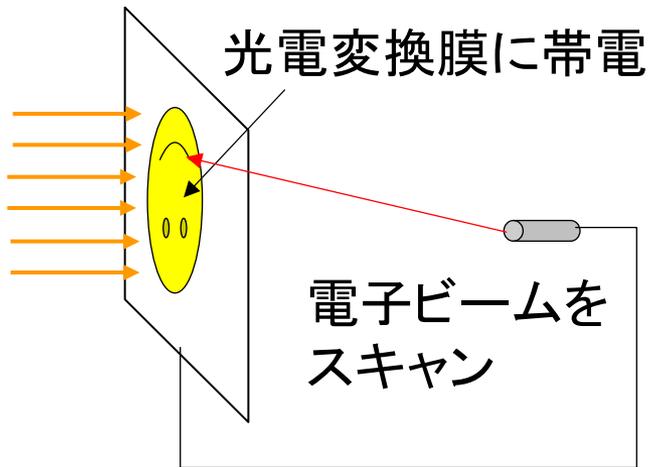
- レンズ交換不可のカメラ
- レンズ交換可のカメラ
 - マウントの種類
 - Fマウント (大口径)
 - Cマウント (小口径, 長フランジバック)
 - CSマウント (小口径, 短フランジバック)
 - 対応する撮像素子サイズ
 - 1", 2/3", 1/2", 1/3", 1/4"
 - 1" で対角長 16 mm (およその目安)
 - 焦点距離
 - 撮像素子サイズと焦点距離 f で画角が決まる
 - $\tan(\theta / 2) = D/2f$ (対角画角 θ , 素子対角長 D)
 - 開放F値
 - 明るさ

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



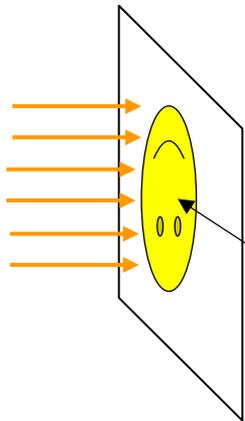
・銀塩カメラ: 光エネルギーでハロゲン化銀を分解



・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

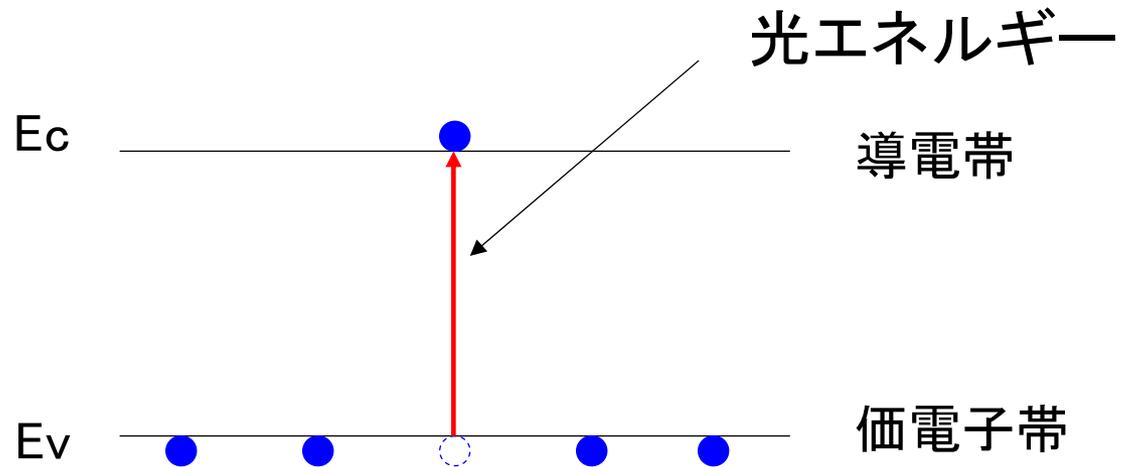
→
信号電流

固体撮像素子



電子が発生

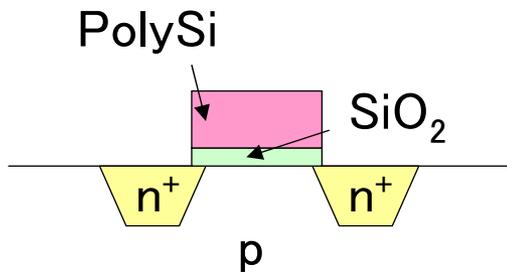
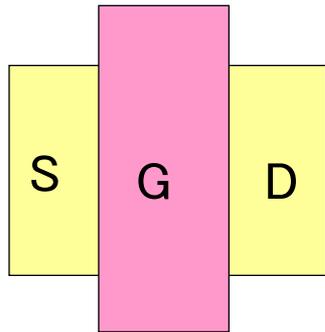
光エネルギーによってシリコン内部の電子が励起し、
信号として取り出せる状態になる (内部光電効果)



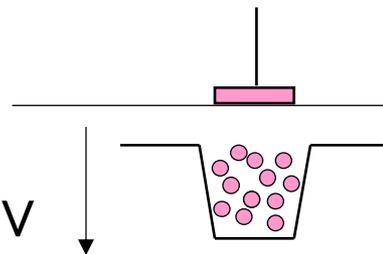
半導体の予備知識

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

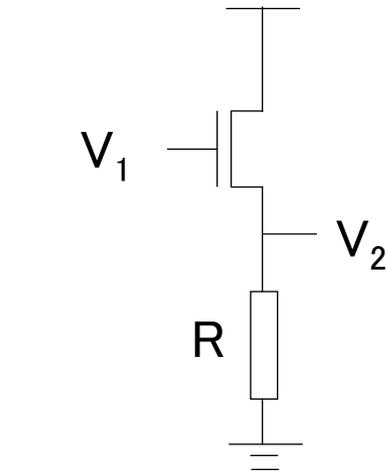
上面から見たところ



断面から見たところ



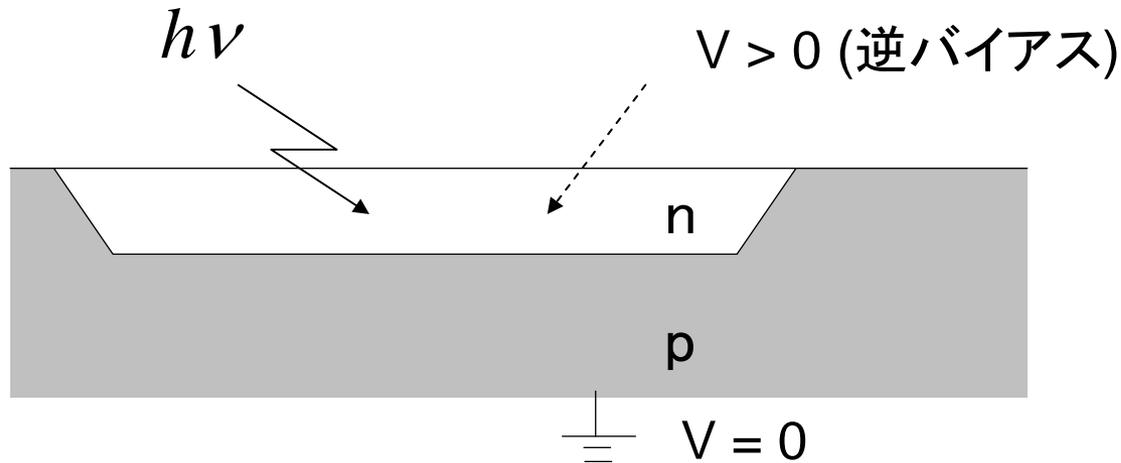
- Gに電圧をかけるとSとDの間に電流を流せるようになる (= MOS スイッチ)



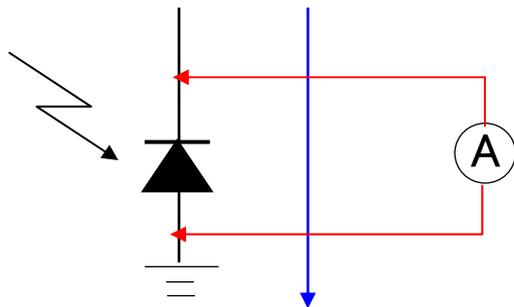
- $V_2 = V_1 + \alpha$
(ソースフォロワアンプ)

- 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）

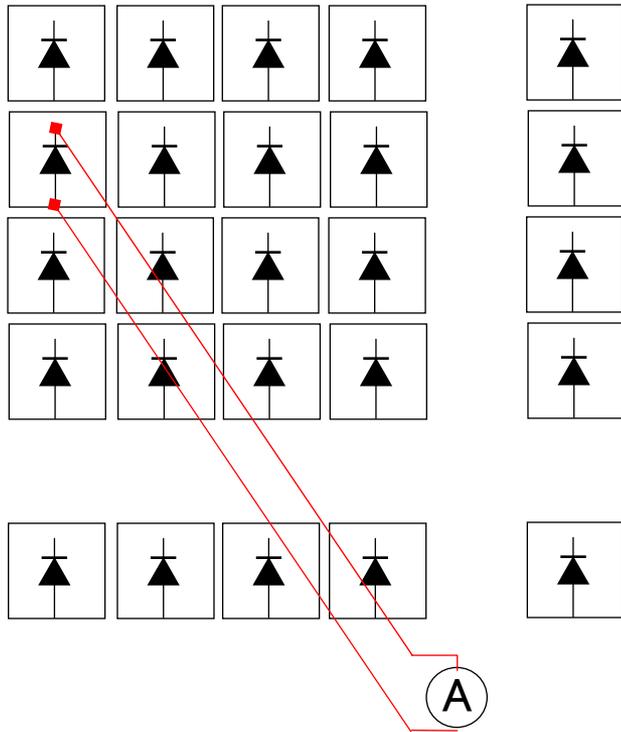


ダイオードに明るさに比例した光電流が逆向きに流れる
(と考えると分かりやすい)



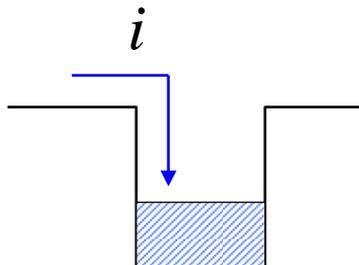
ここを電流計で測ればよい? → 通常はそうしない

光電流の蓄積



なぜ電流を直接測定しないのか?

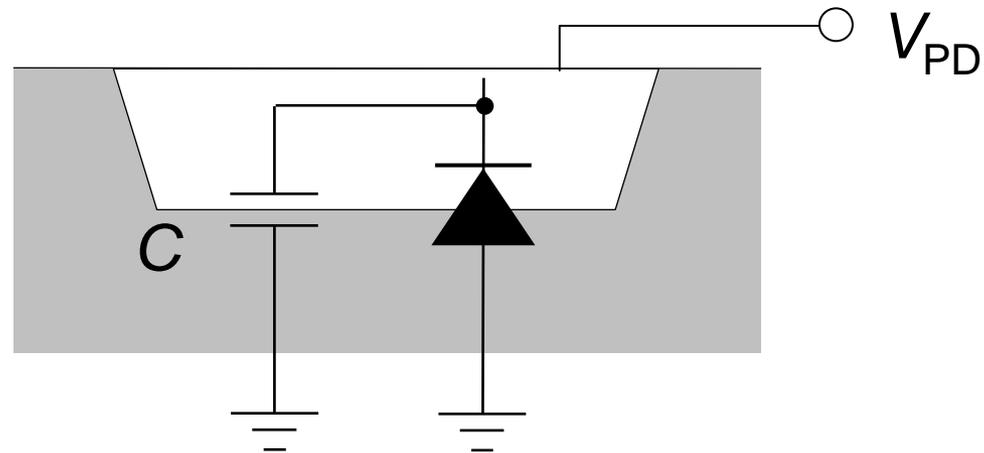
- 光電流は非常に微弱である
 - pA ~ fA のオーダー
 - 極めてノイズに弱い
- 画素数の本数だけ信号線を引き出すわけにはいかないので、時分割多重で読み出す必要がある
 - ほとんどの時間では信号はただ捨てられてしまう



$$Q = \int_0^T i dt$$

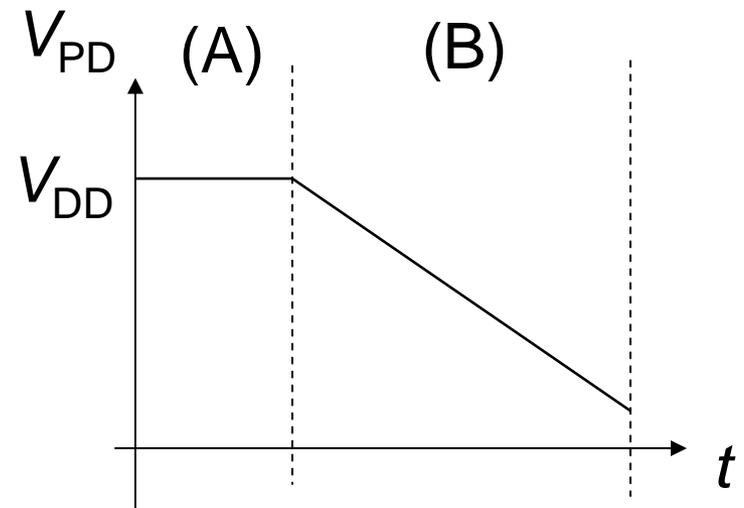
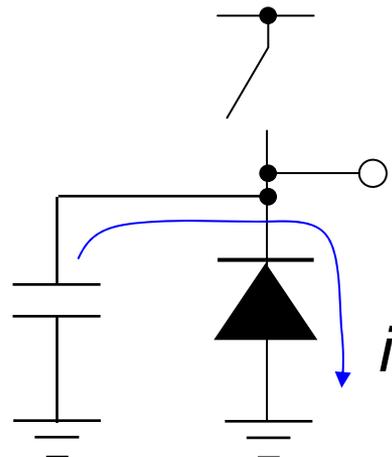
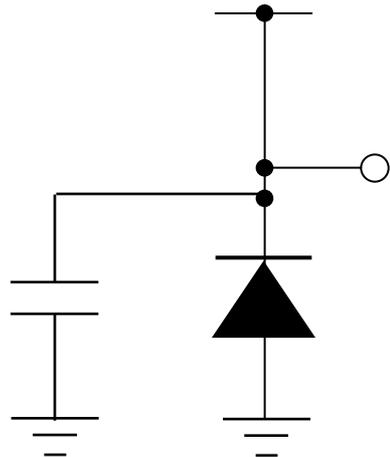
時間積分することで、雑音成分を相対的に低減する (S/N比を上げる)

Schematic Description

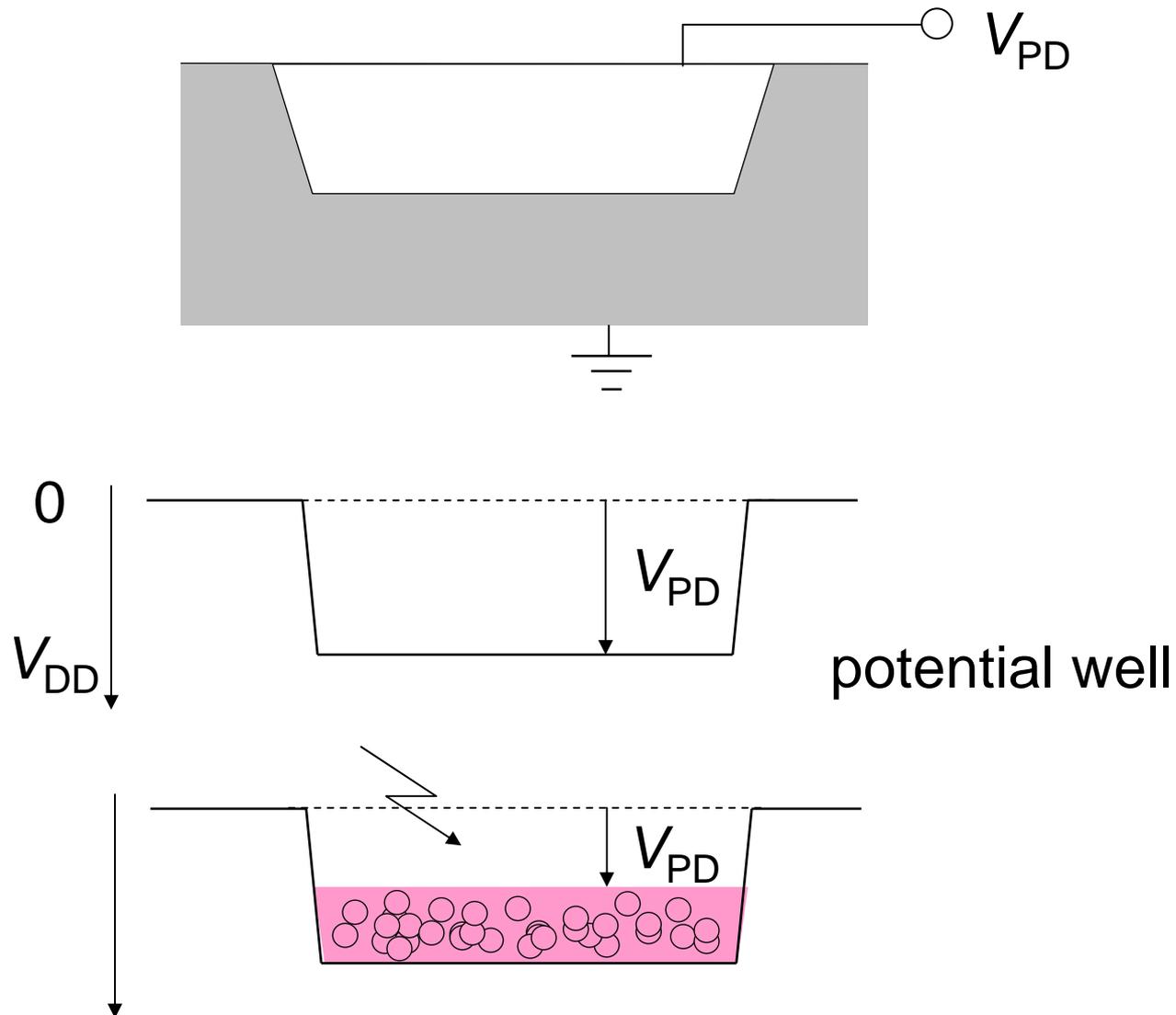


(A) Reset

(B) Integration



Potential Description



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

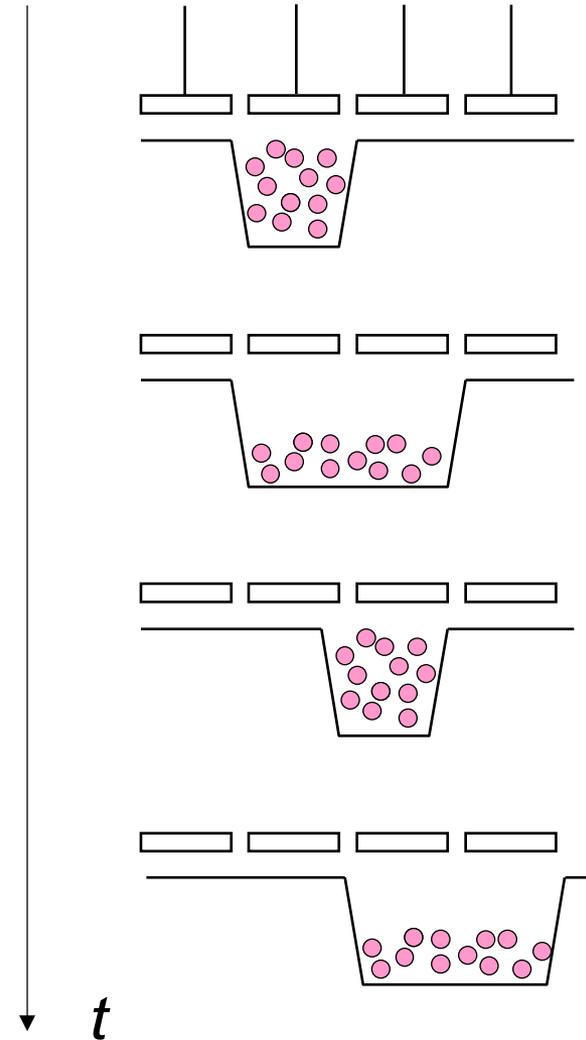
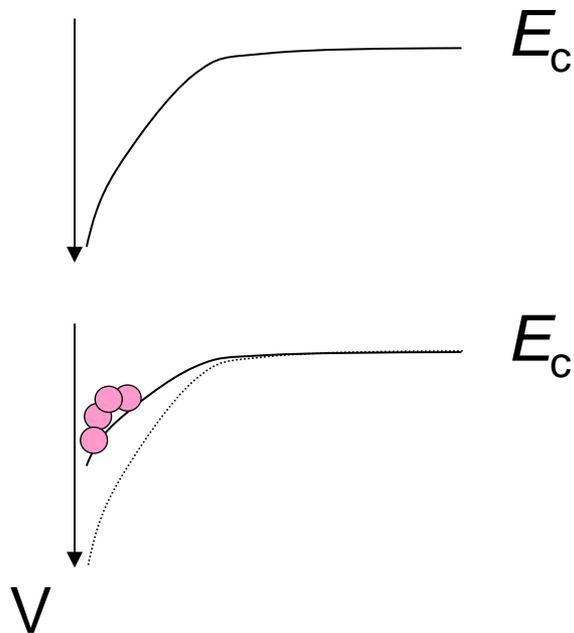
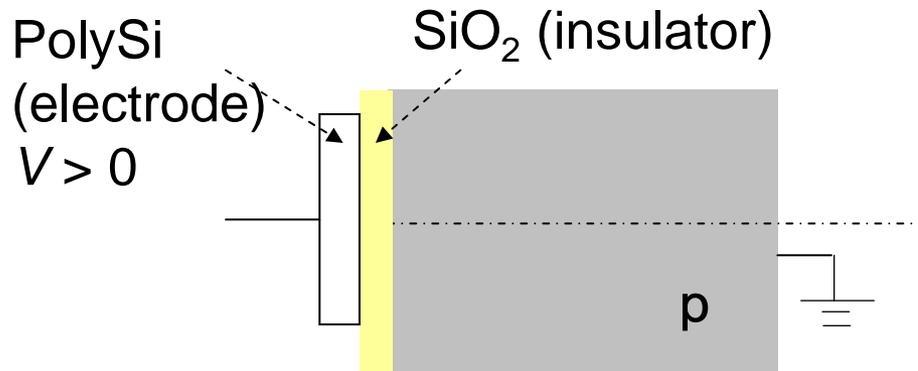
CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

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

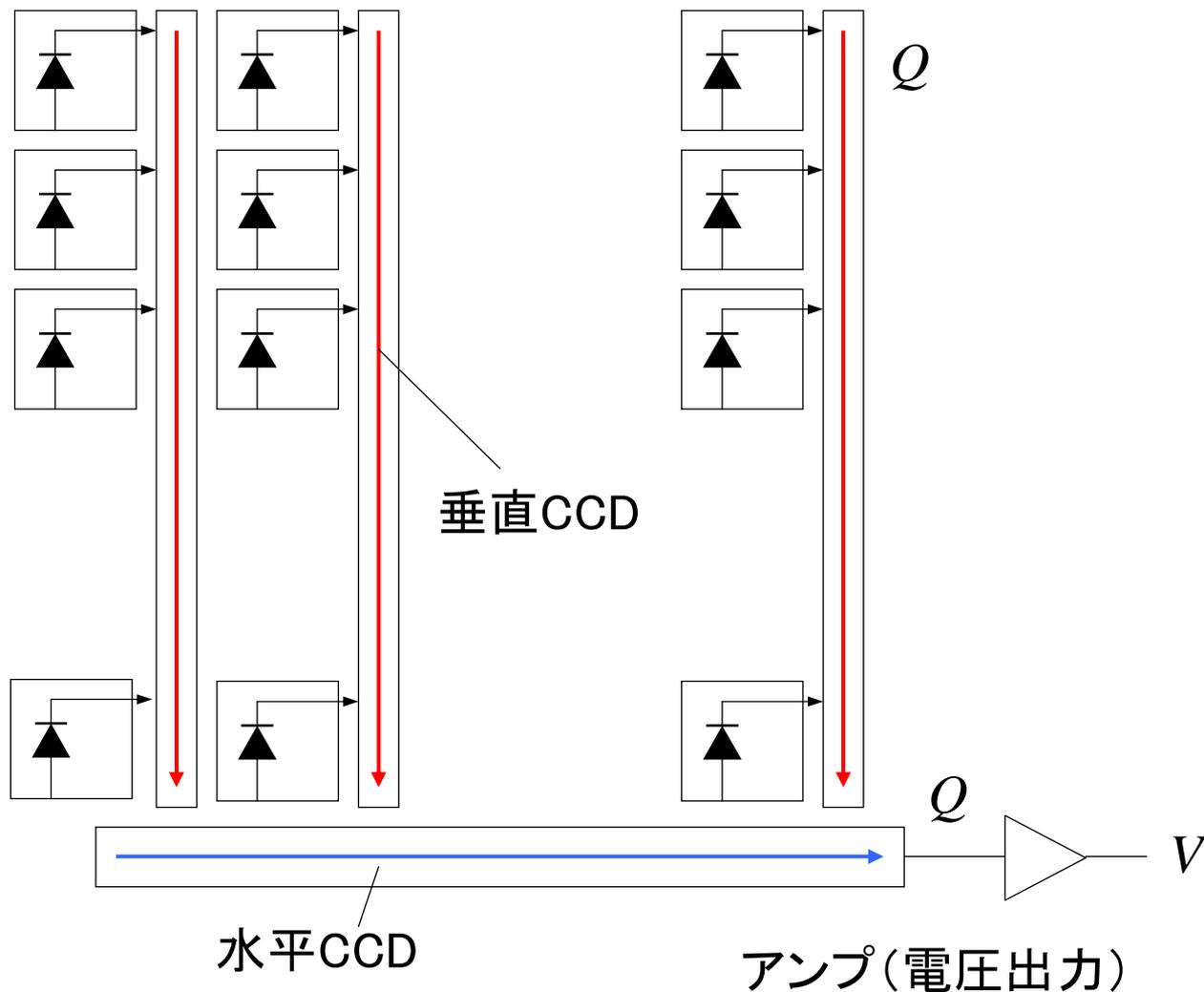
CCD sensor: $h\nu \longrightarrow Q \longrightarrow V$
within pixel

CMOS sensor: $h\nu \longrightarrow Q \longrightarrow V$
within pixel

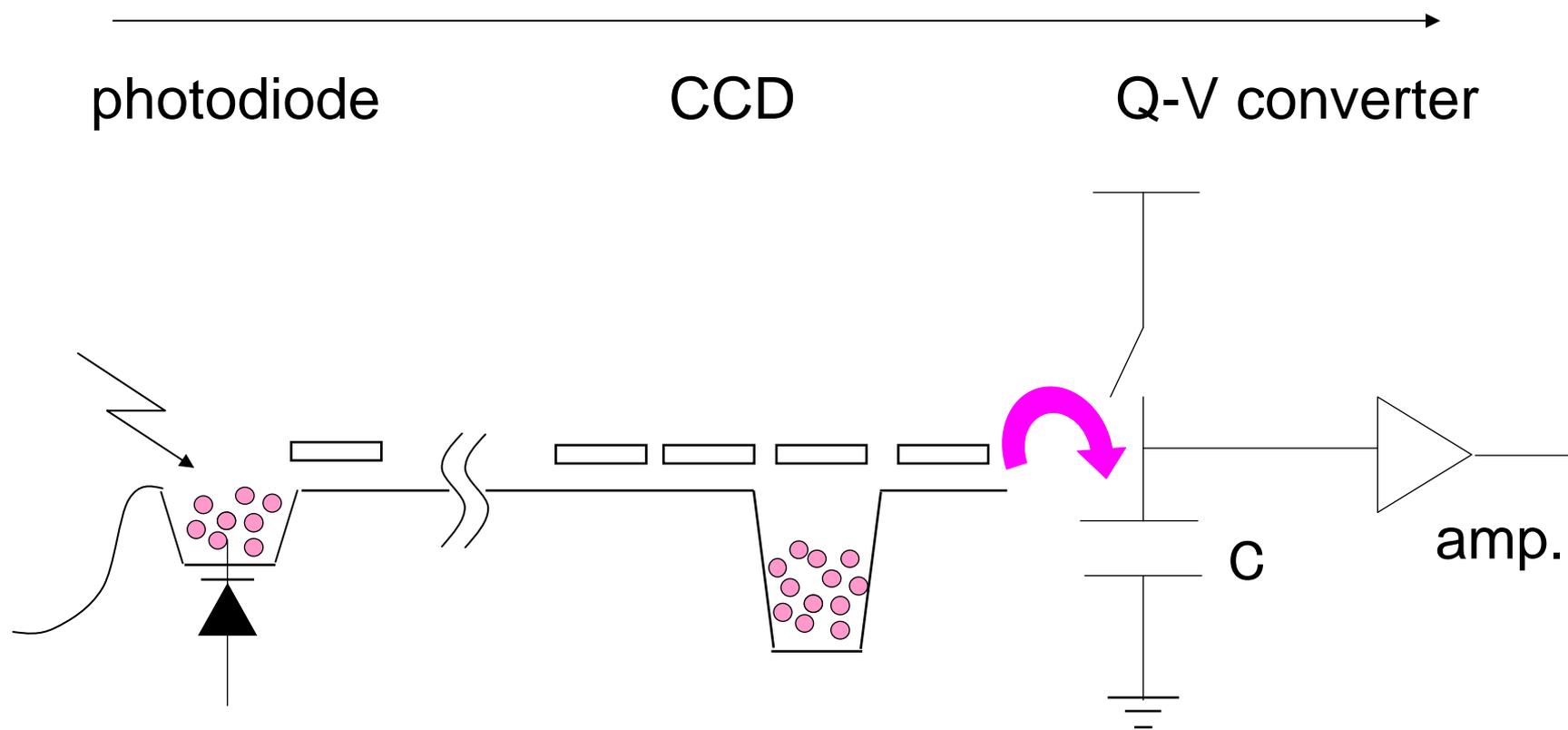
CCD (Charge-Coupled Device)



インターライン転送型CCDセンサ (IT-CCD)

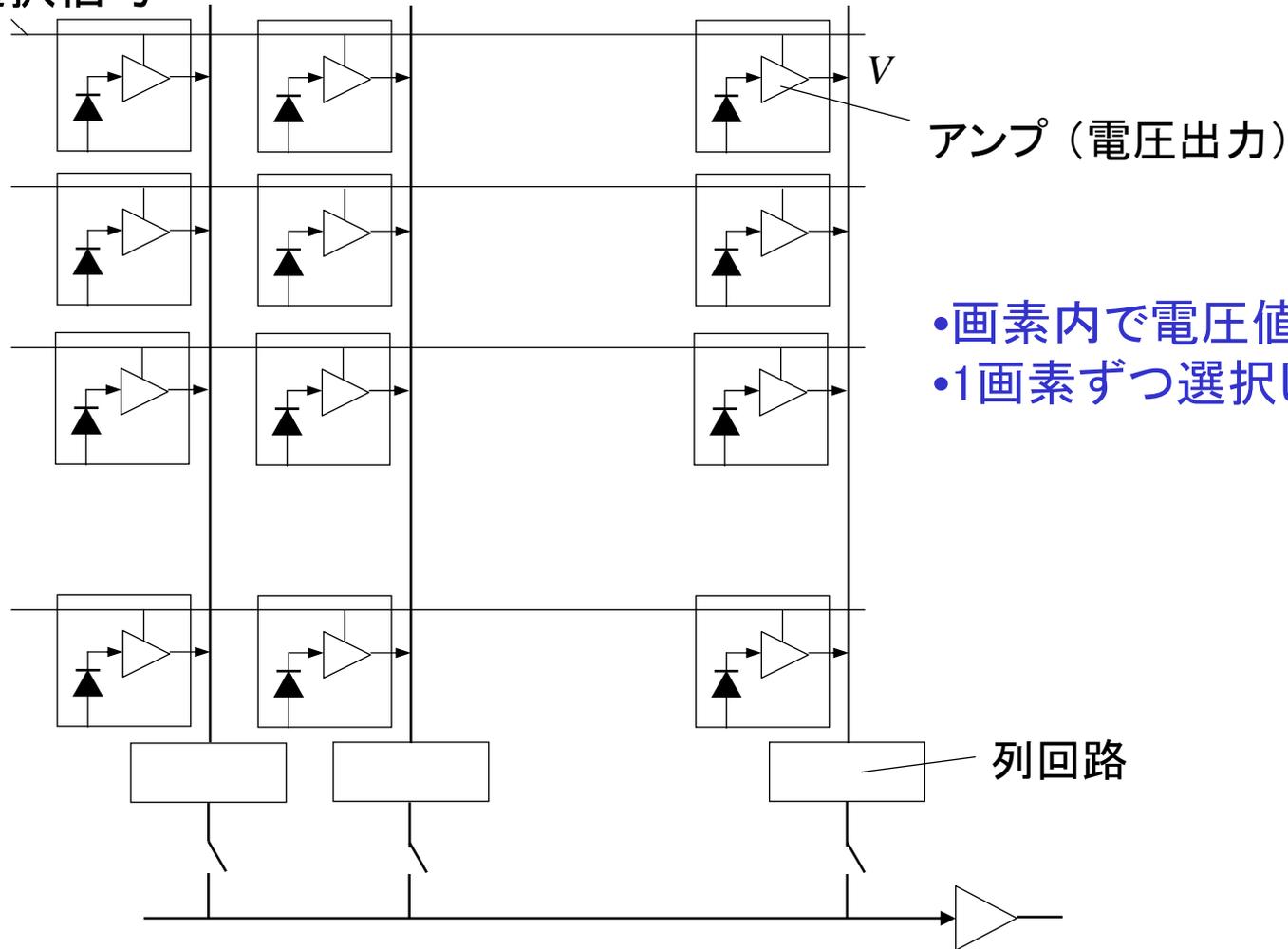


Signals in a CCD sensor



CMOS の場合

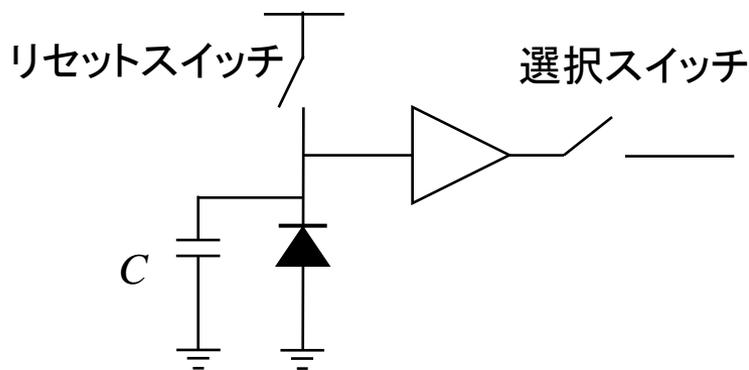
行選択信号



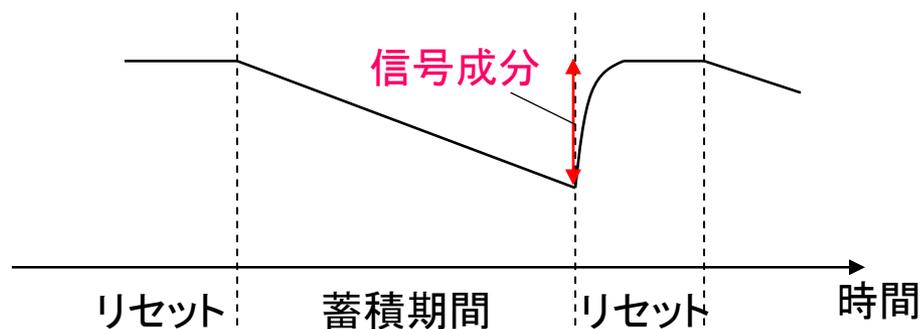
- 画素内で電圧値に変換
- 1画素ずつ選択して読み出す

CMOS アクティブピクセルセンサ (APS)

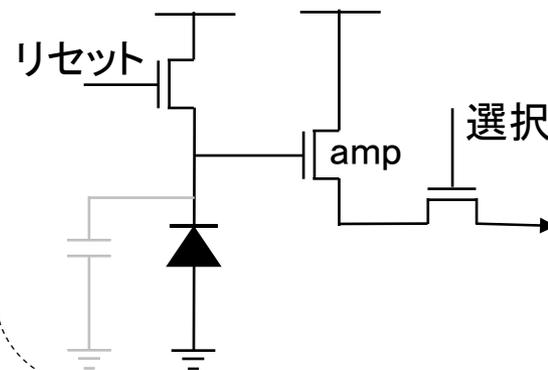
CMOS APS の画素構成



- 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)



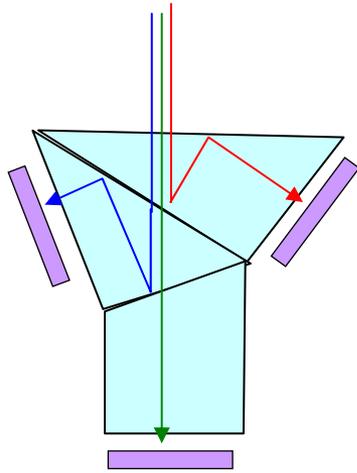
(詳細回路)
3トランジスタ APS



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ルビリティなどで有利

カラー化

3板式

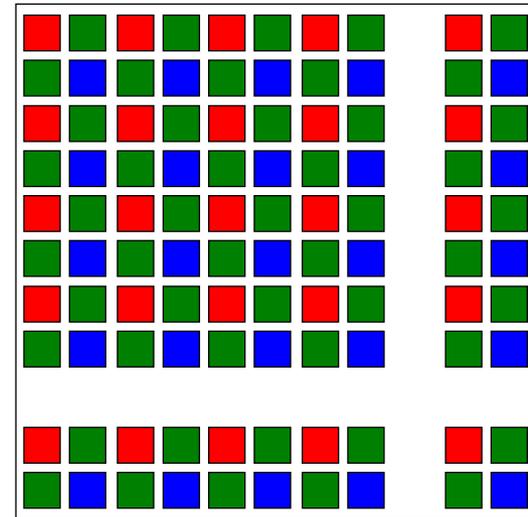


イメージセンサ x 3

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

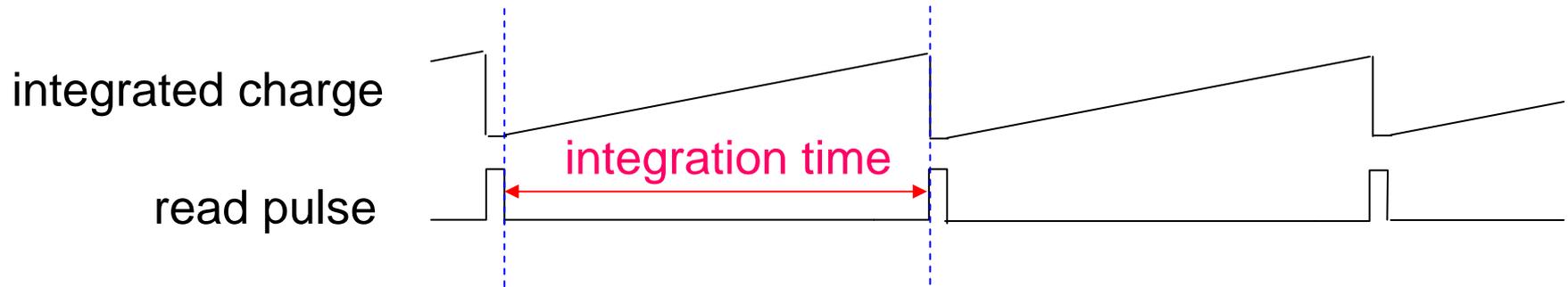
スミア (CCDセンサに特有)



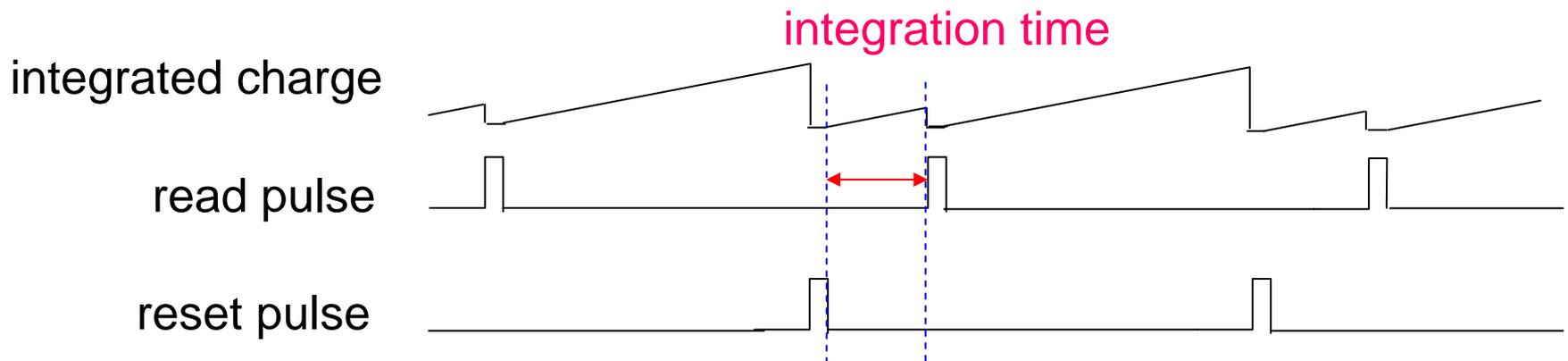
- 明るい部分の上下に縦に白いラインが発生
- 垂直CCDへの電荷混入が原因

電子シャッタ

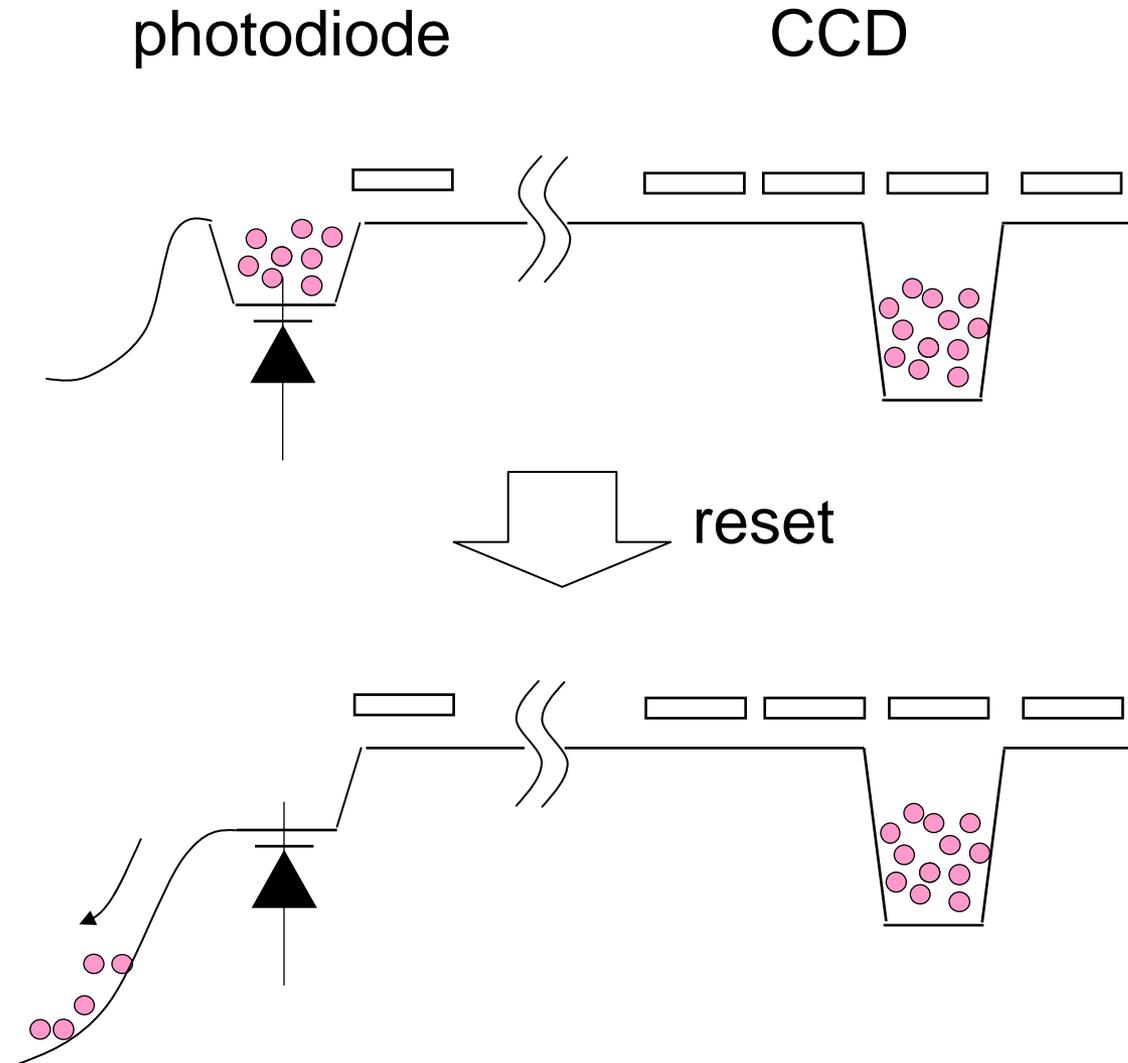
IT-CCD (w/o electronic shutter):



IT-CCD (with electronic shutter):

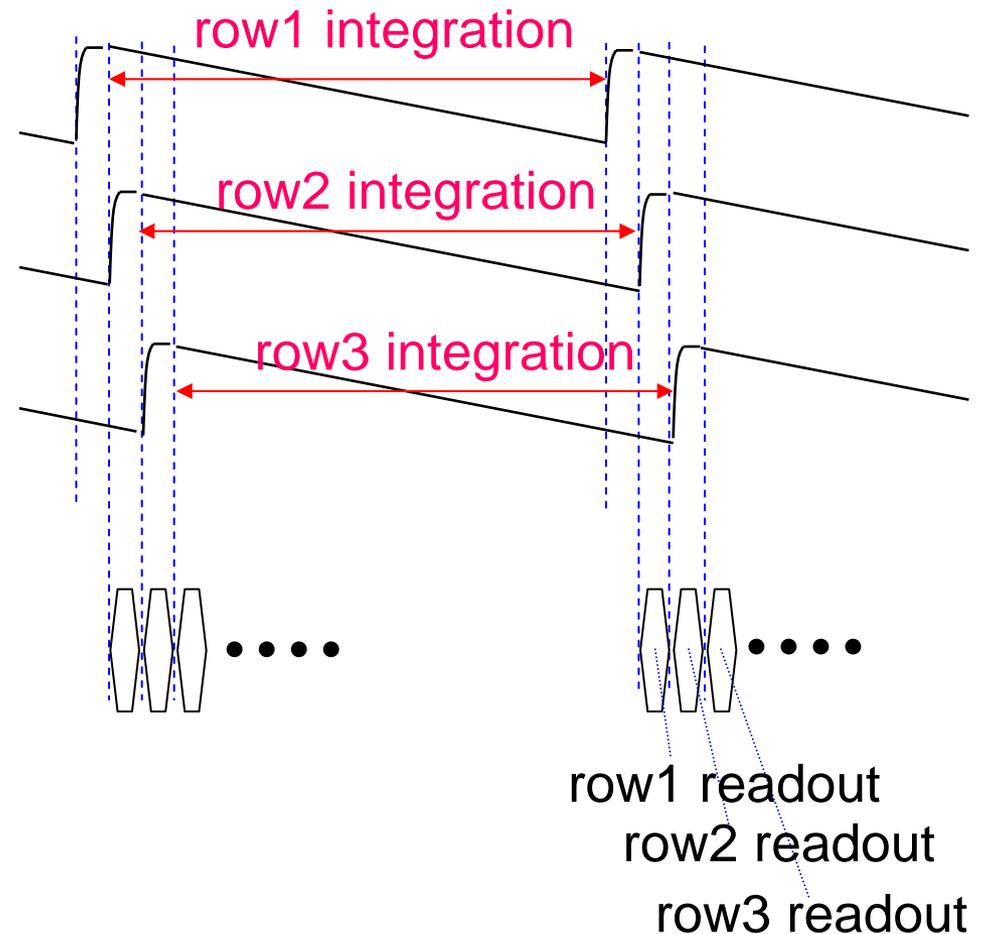
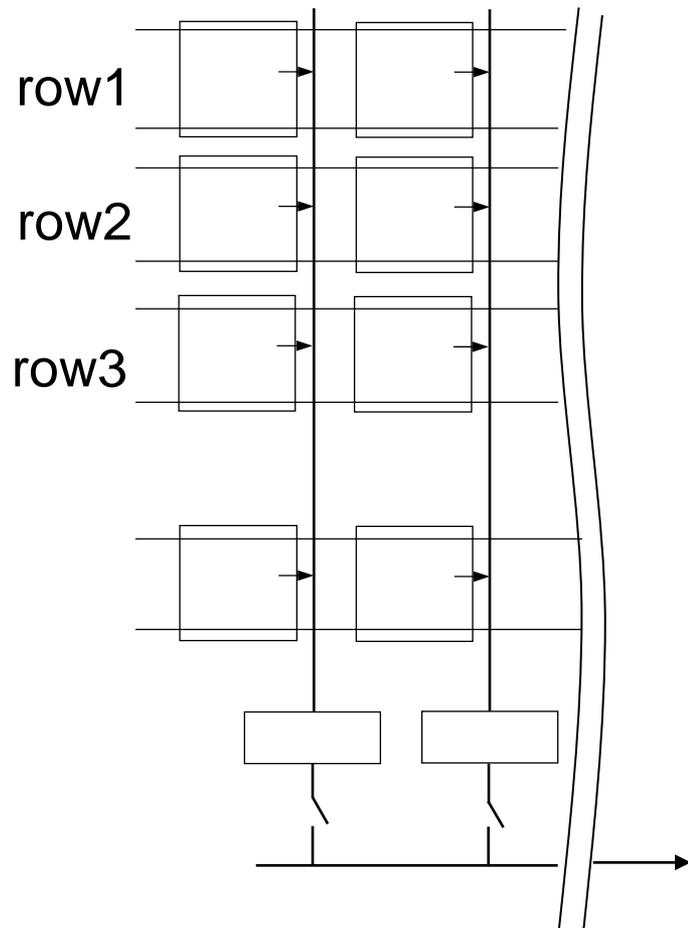


Resetting in IT-CCD



シャッターモード

While IT-CCDs operate in the **global shutter mode**,
3T-APS CMOS sensors operate in the **rolling shutter mode**



References

- 米本 和也: CCD/CMOSイメージ・センサの基礎と応用, CQ出版社, 2003.
- デジタル画像処理編集委員会, デジタル画像処理, CG-ARTS協会, 2004.
- Jun Ohta: Smart CMOS Image Sensors and Applications, CRC Press, 2008.
- Eugene Hecht: Optics, Pearson Education, 2002. (尾崎, 朝倉訳: ヘクト光学I, 丸善, 2002)
- Alexander Hornberg ed.: Handbook of Machine Vision, Wiley-VCH, 2006.