
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

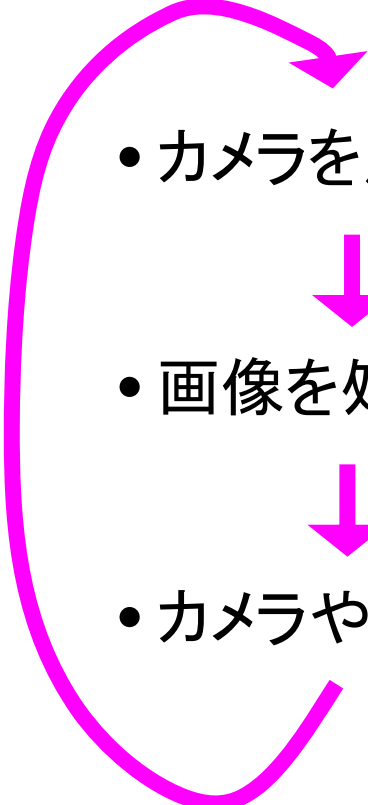
鏡 慎吾

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

2009.05.12

「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

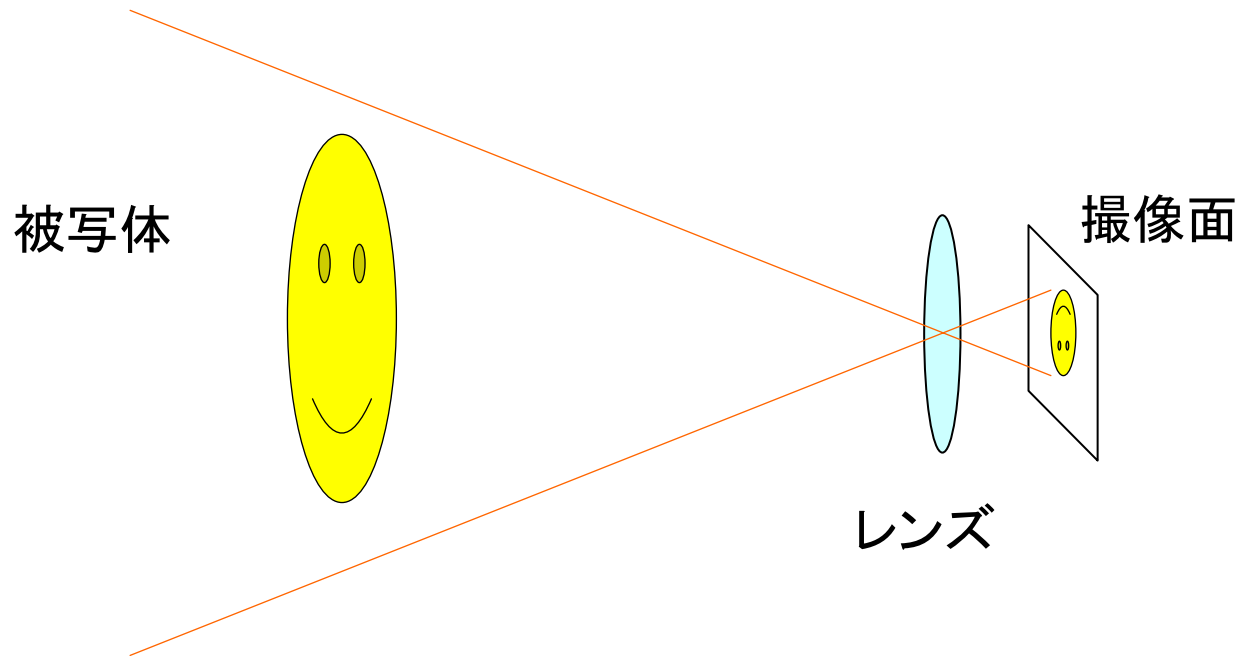
- カメラやマニピュレータの運動を計算し、制御する(前半)

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

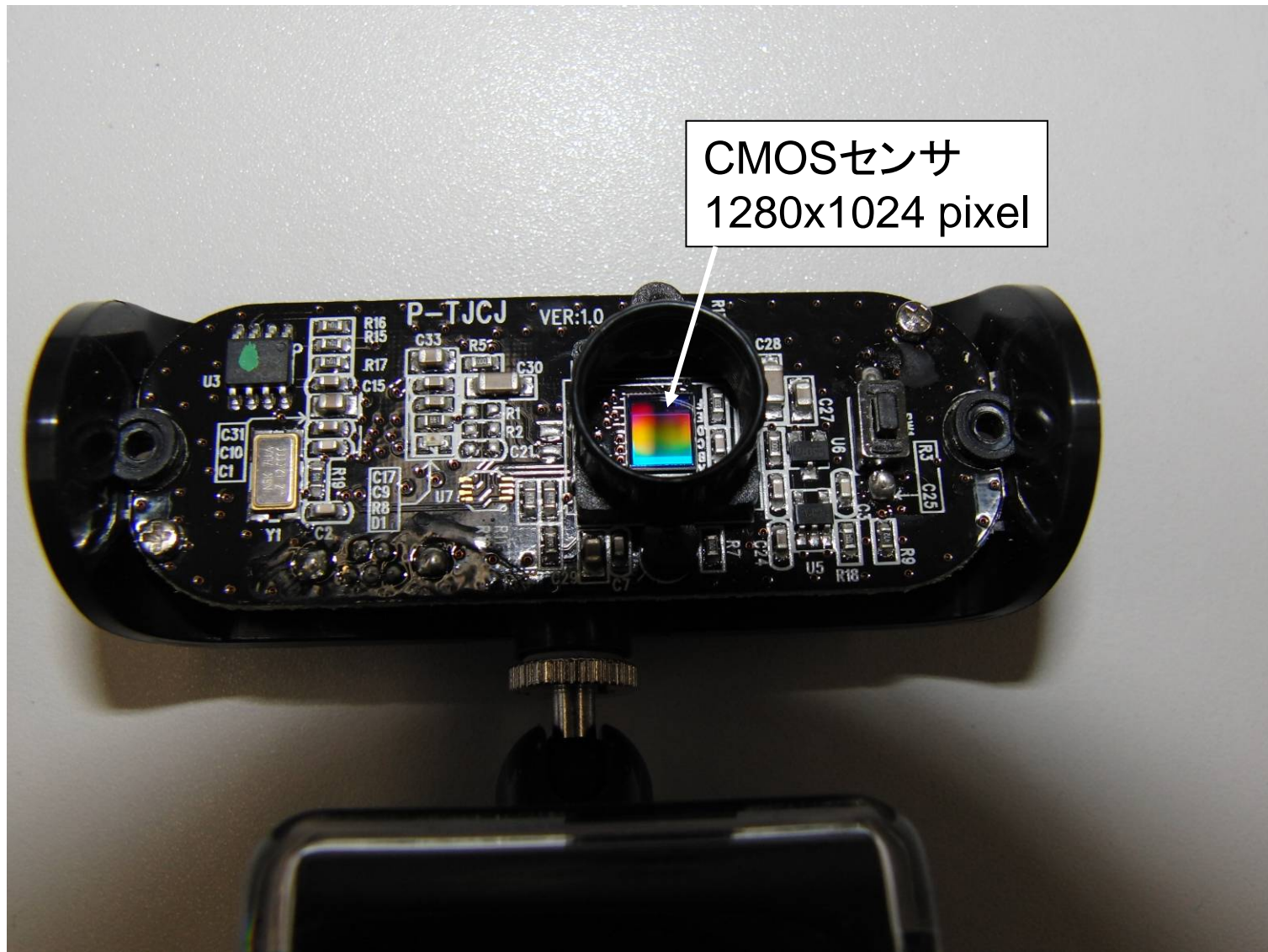


ELECOM
UCAM-DLM130HSV

カメラの例

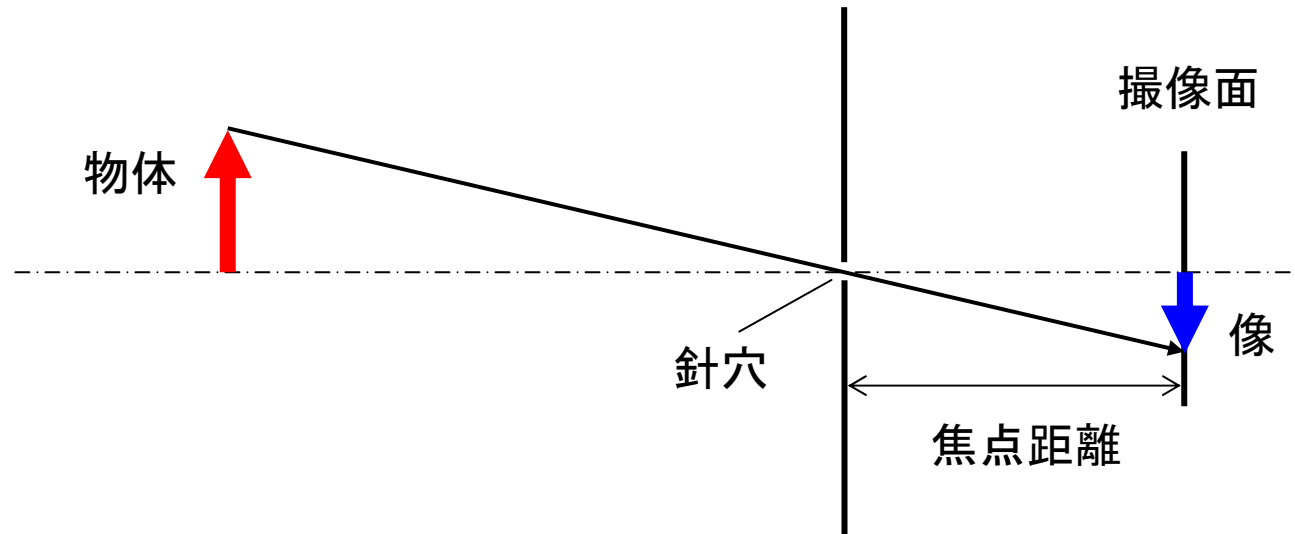


カメラの例



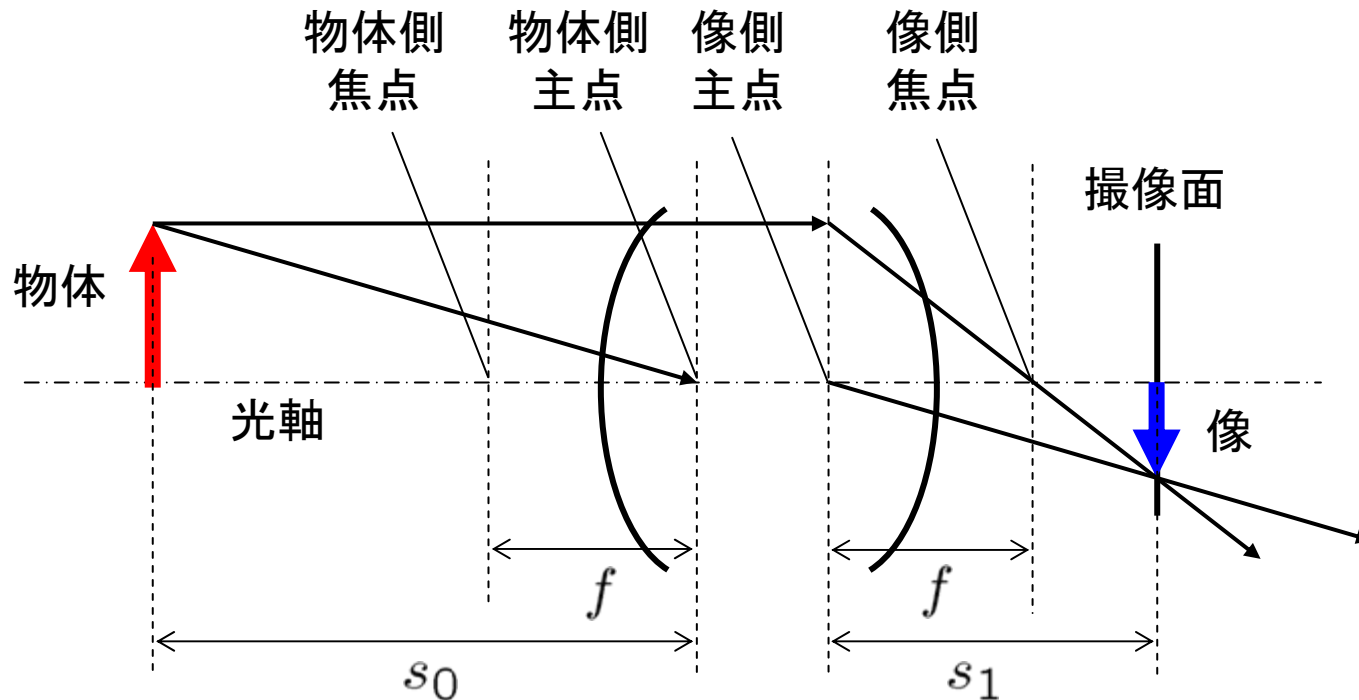
CMOSセンサ
1280x1024 pixel

ピンホールカメラ



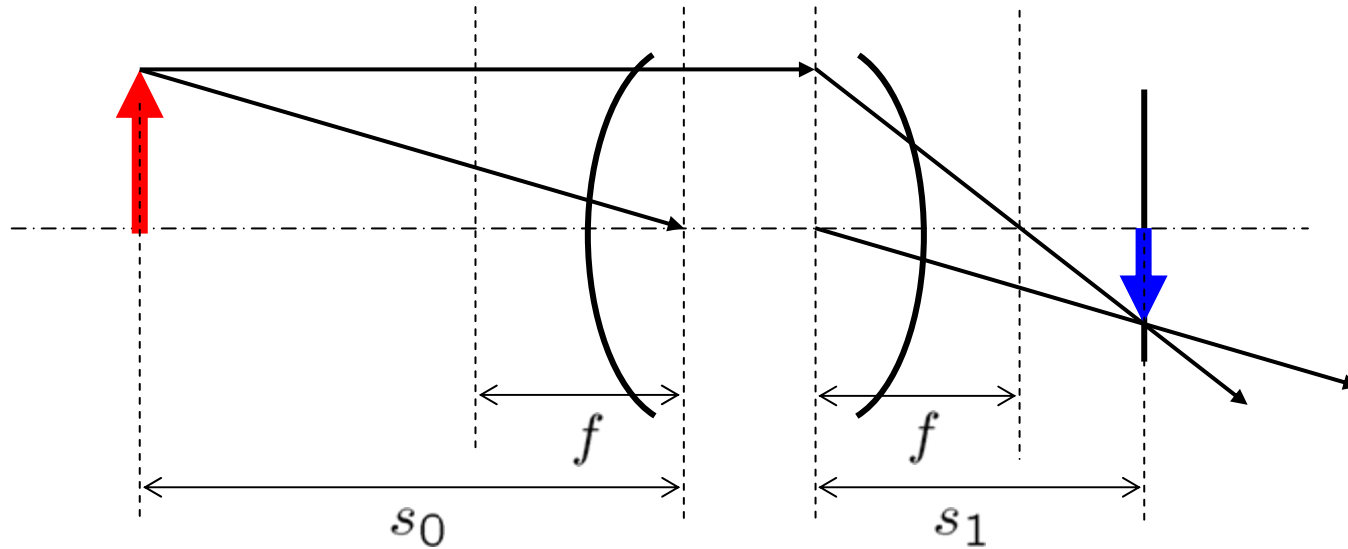
- 基本はピンホールカメラである.
- 撮像面のある一点に当たる光は, その点とピンホールを結ぶ直線上のどこかから発せられたものである.
- 被写体までの距離は理論上無制限
- ピンホールを通らない光は無駄 → 光量を稼げない

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



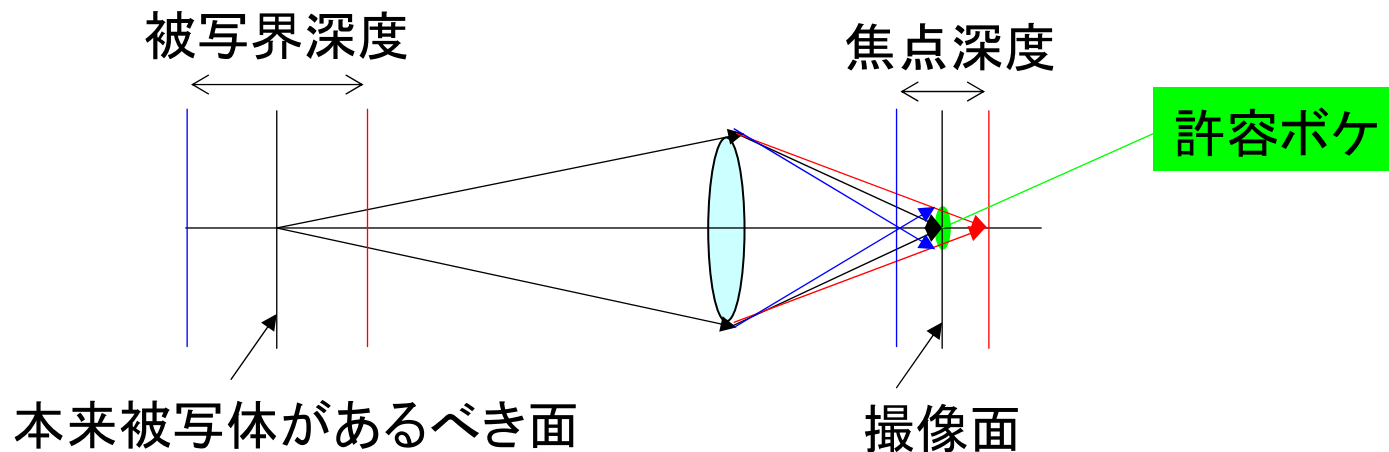
焦点距離 f のレンズで、距離 s_1 の位置に撮像面があるとすると、距離 s_0 の位置にある被写体だけが距離 s_1 の面に結像する。
ただし s_0 は以下で与えられる:

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

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。**

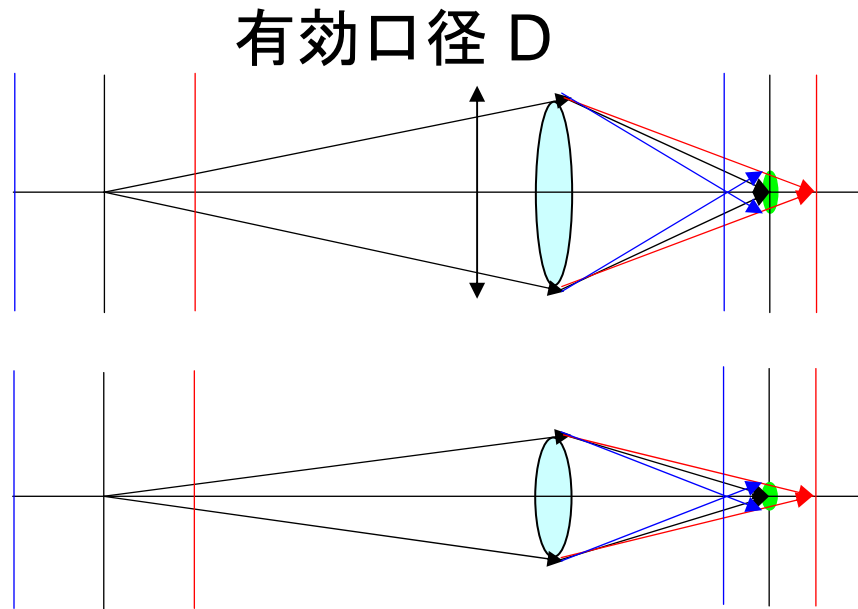
被写界深度

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



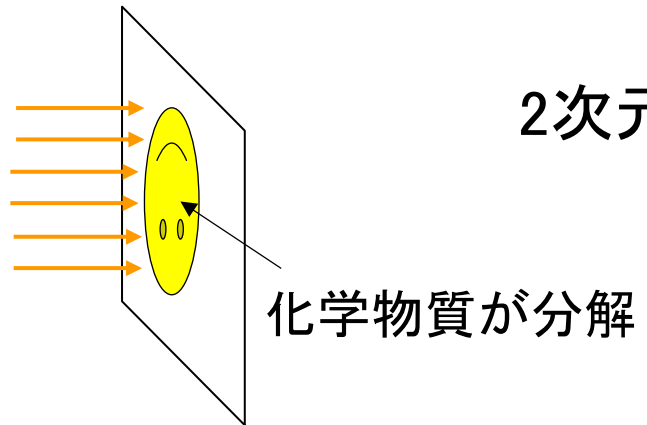
$$F \text{ 値} = f / D$$

F値が小さいほど
明るい、その分
被写界深度が浅くなる

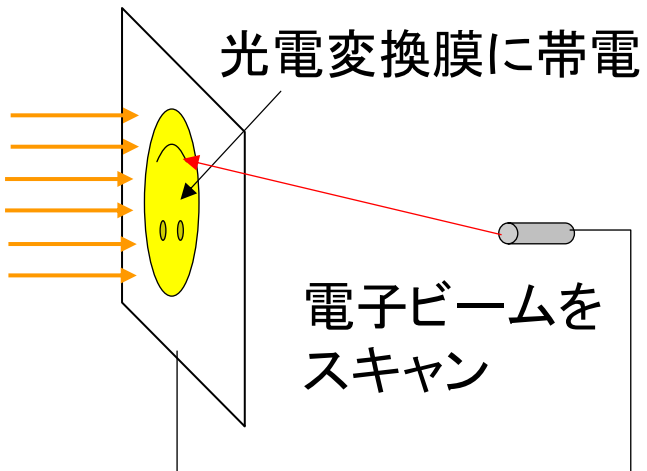
- 焦点距離が同じで、レンズの有効口径のみが違う2組のレンズを考える
- 物体上のある点から出た光線束は有効口径を底面とする(斜)円錐をなしながら撮像面と交わると見なせる
- ピントが完全に合っている場合、円錐の頂点は撮像面上にある
- ピントが完全に合っていない場合、撮像面による円錐の断面積がボケに相当
- レンズ口径が小さい方が断面積が小さいので、ボケも小さい

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



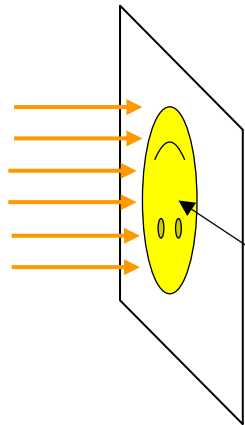
- ・銀塩カメラ: 光エネルギーでハロゲン化銀を分解



- ・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

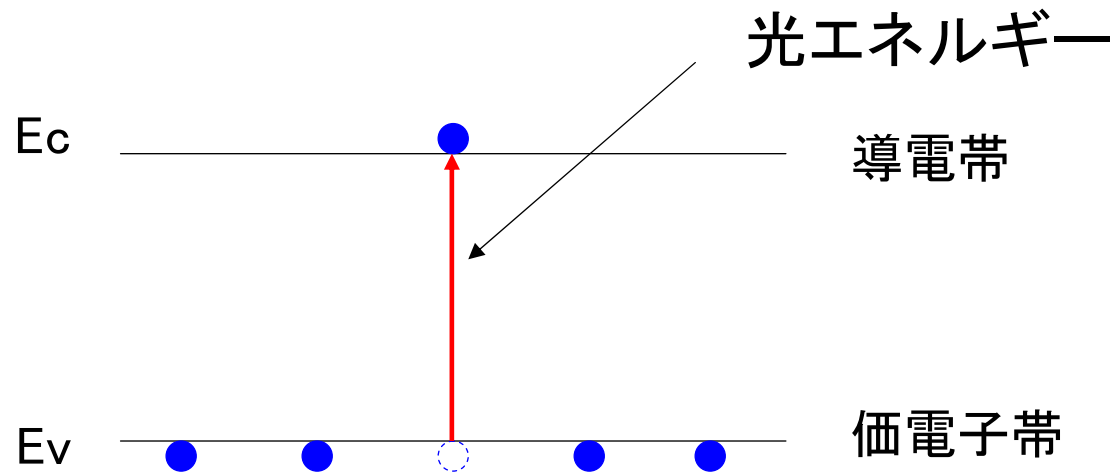
→
信号電流

固体撮像素子



電子が発生

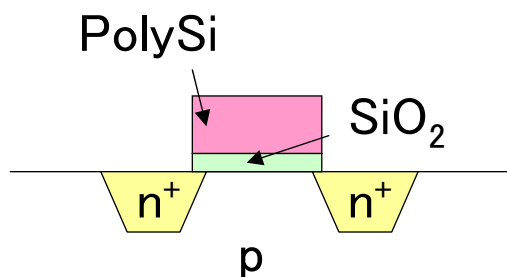
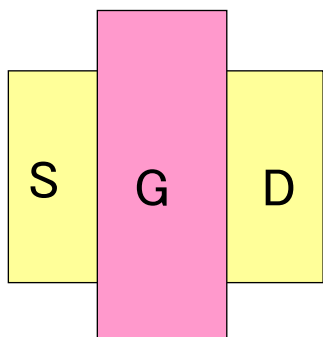
光エネルギーによってシリコン内部の電子が励起し、
信号として取り出せる状態になる (内部光電効果)



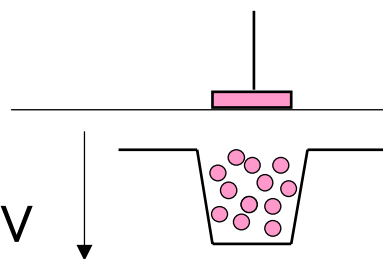
半導体の予備知識

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

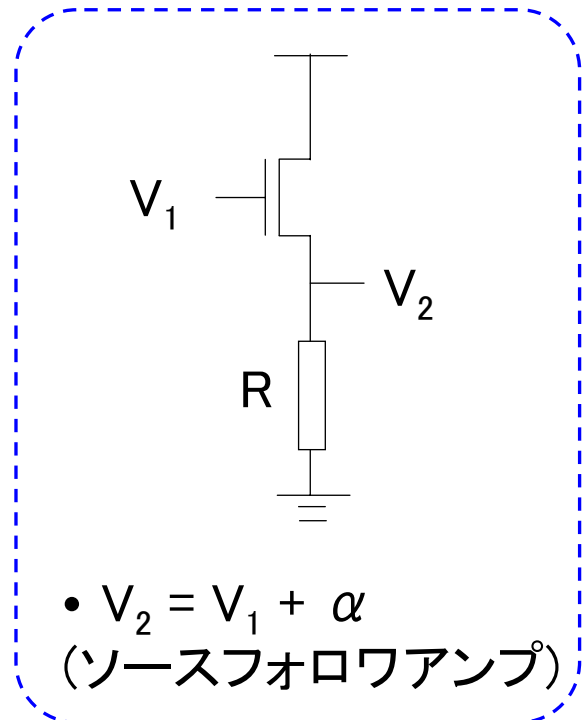
上面から見たところ



断面から見たところ



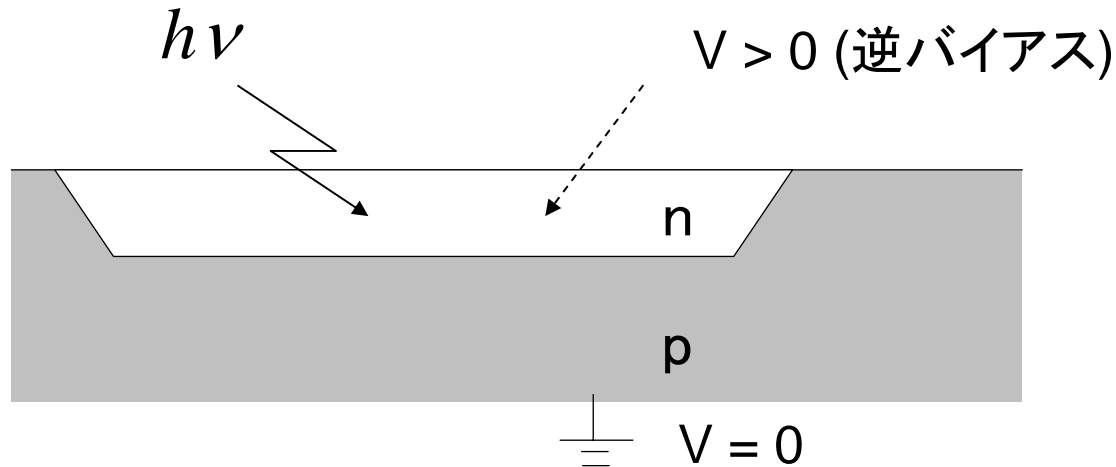
- Gに電圧をかけるとSとDの間に電流を流せるようになる (= MOS スイッチ)



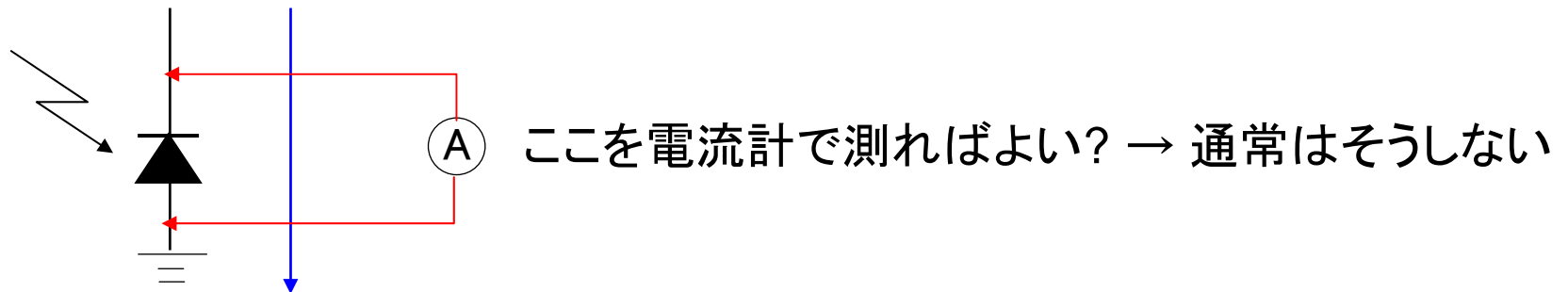
- $V_2 = V_1 + \alpha$
(ソースフォロワアンプ)

- 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

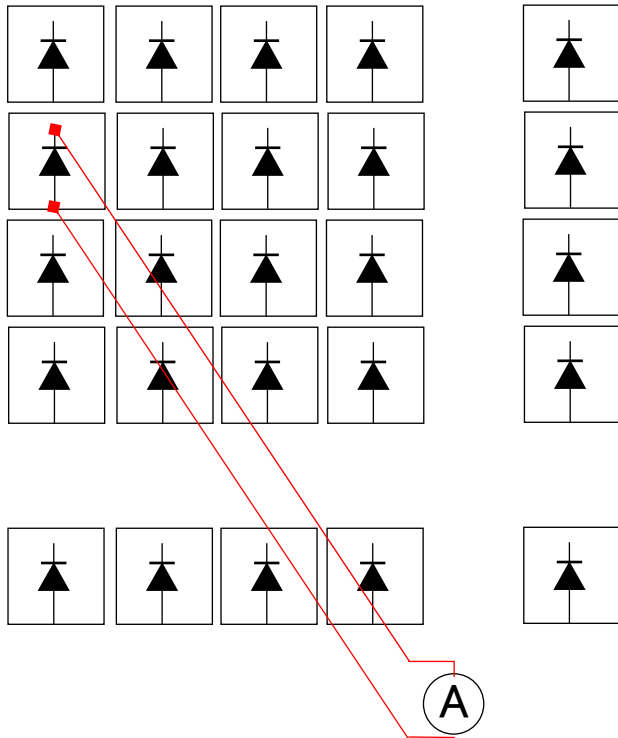
光電変換（フォトダイオード）



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)

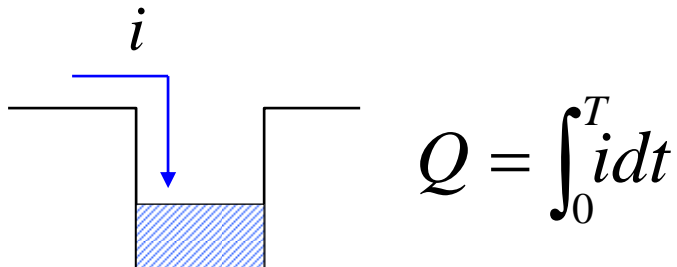


光電流の蓄積



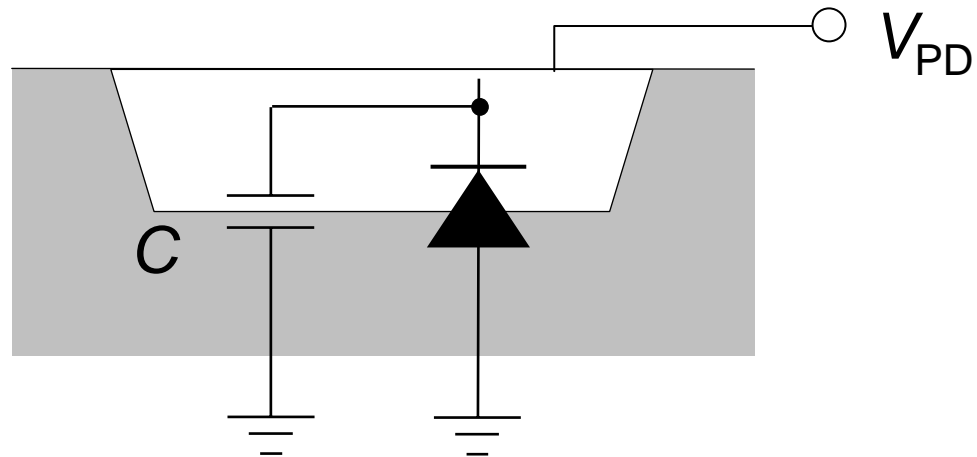
なぜ電流を直接測定しないのか？

- 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

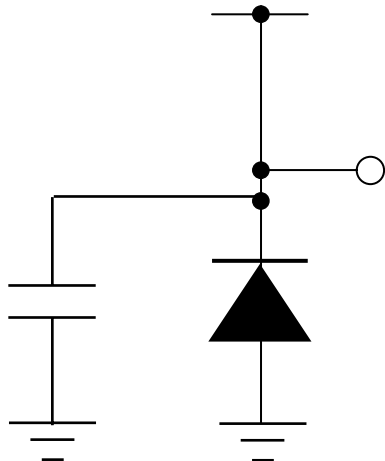


時間積分することで、雑音成分を相対的に低減する (S/N比を上げる)

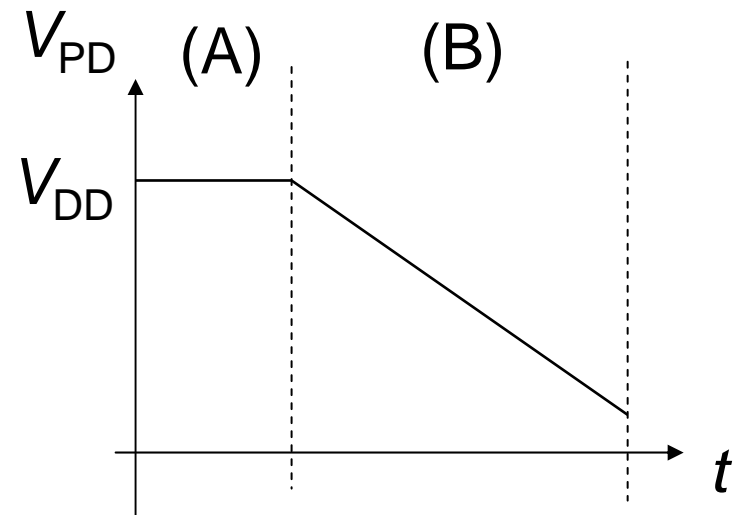
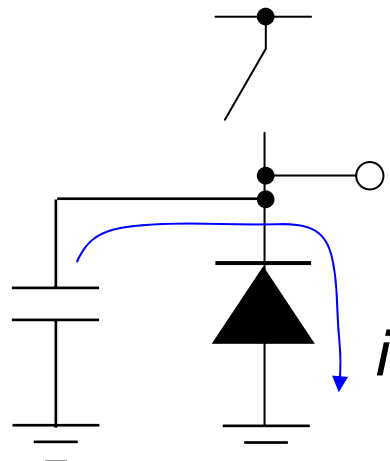
Schematic Description



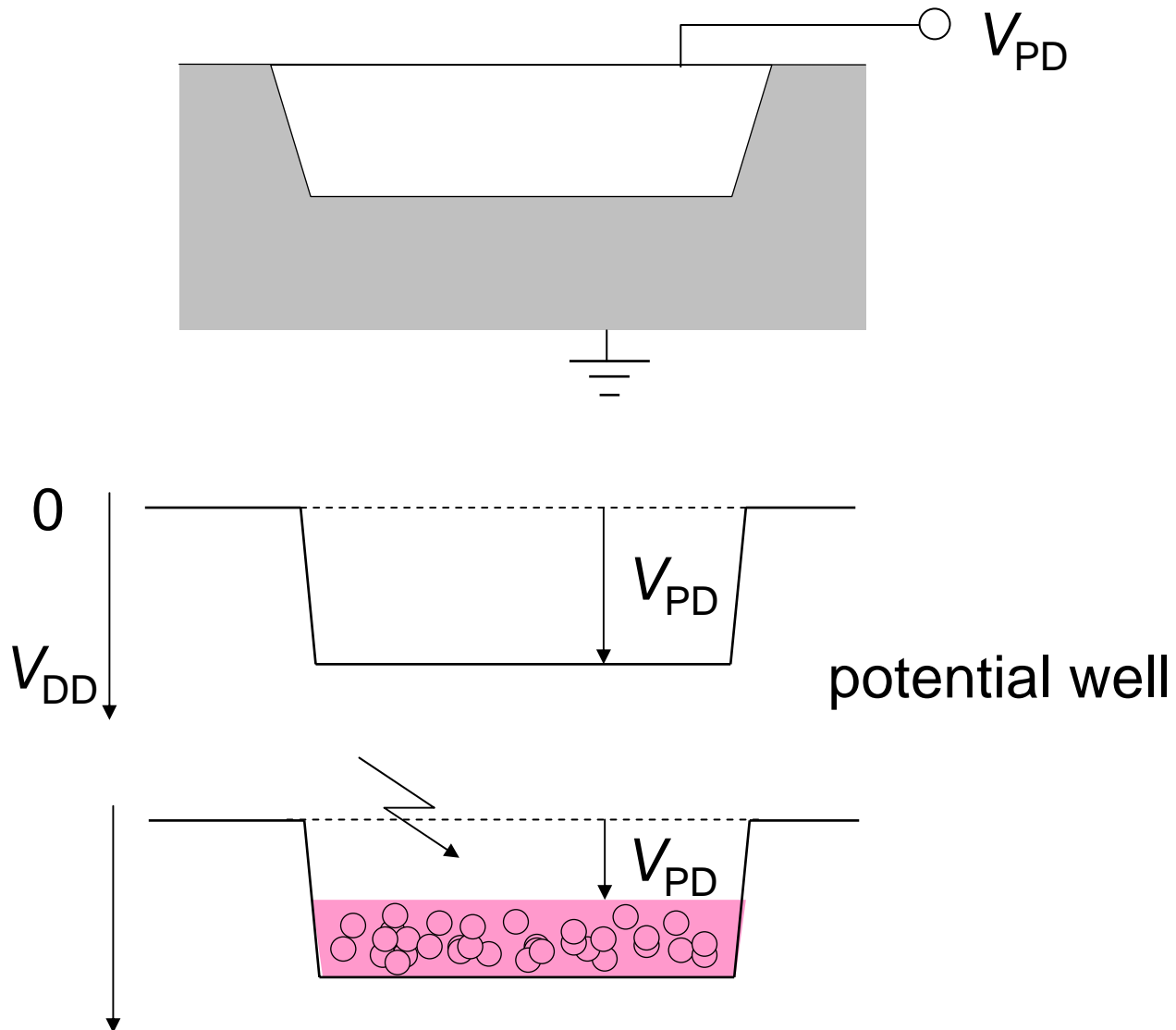
(A) Reset



(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

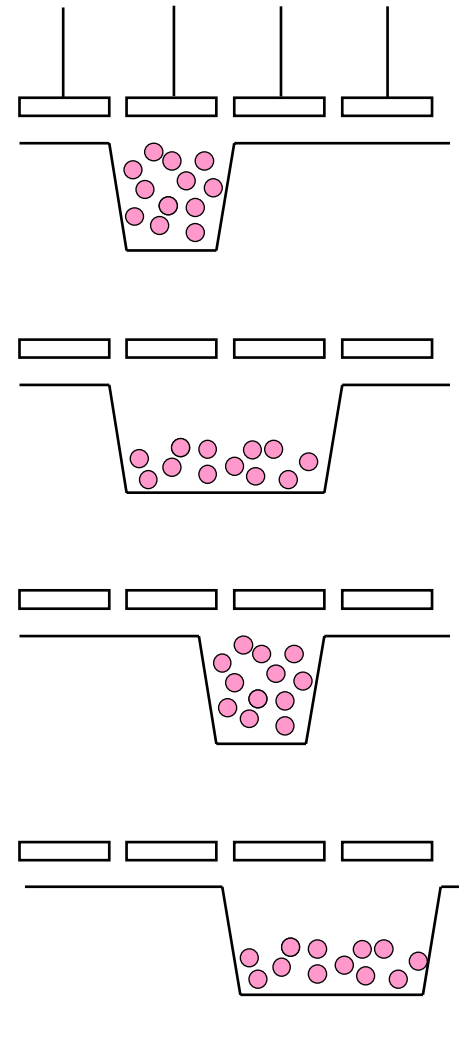
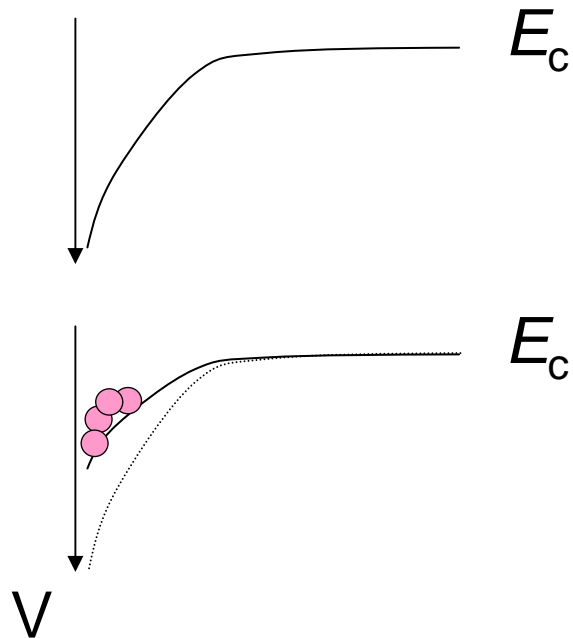
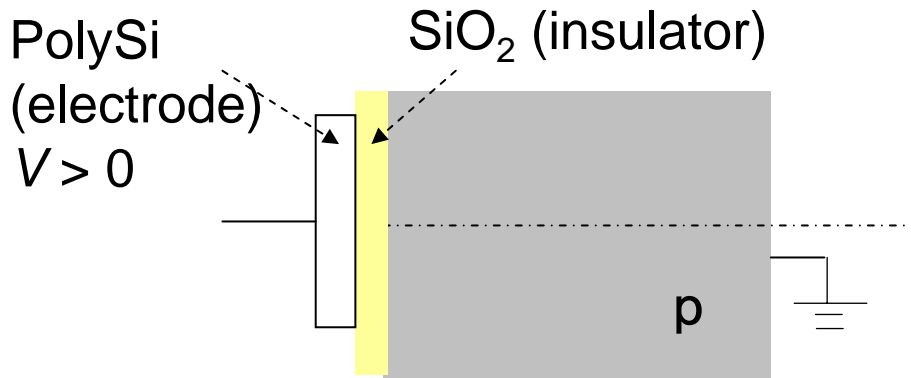
CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

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

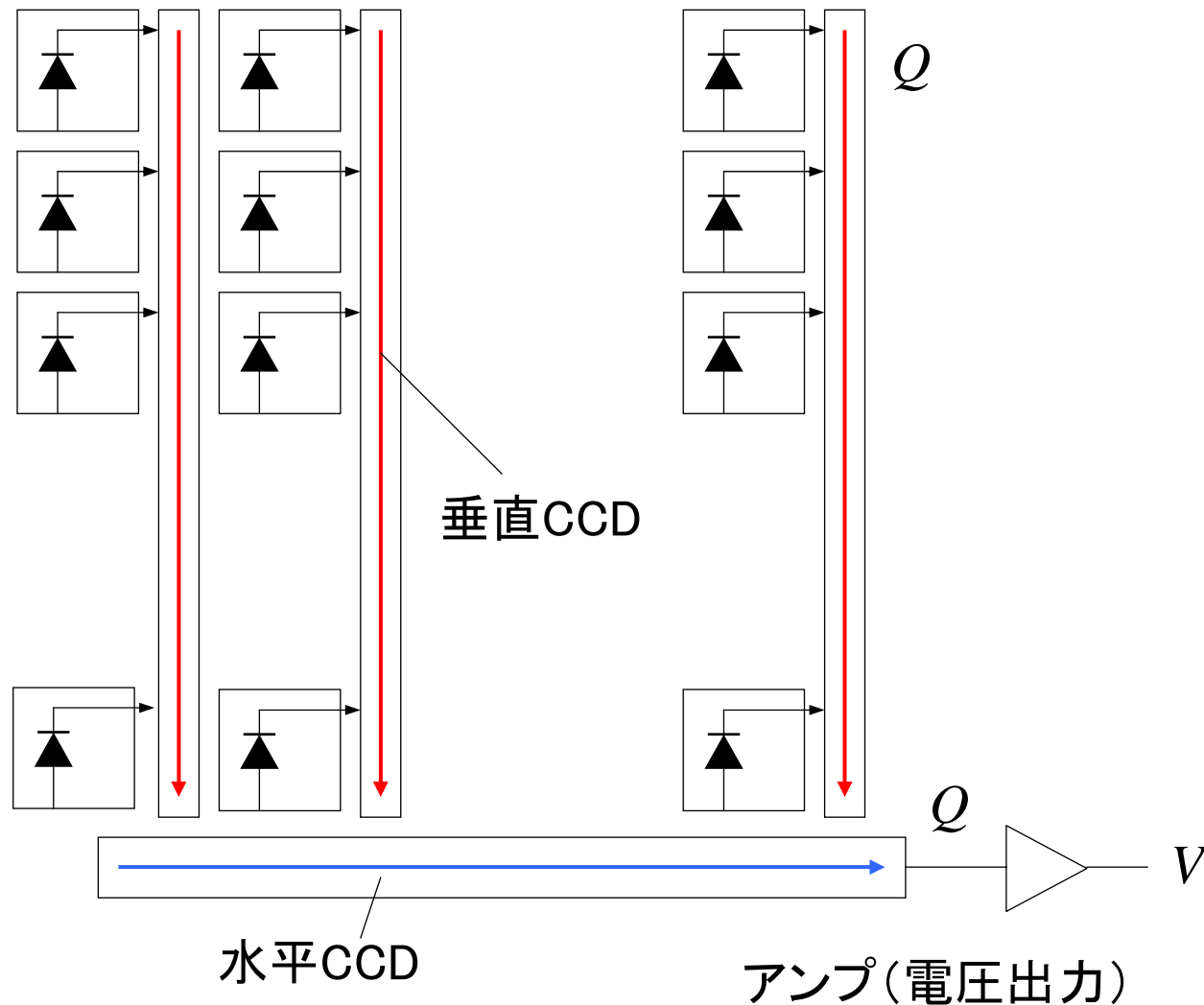
CCD sensor: $h\nu \longrightarrow Q \longrightarrow V$
within pixel

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

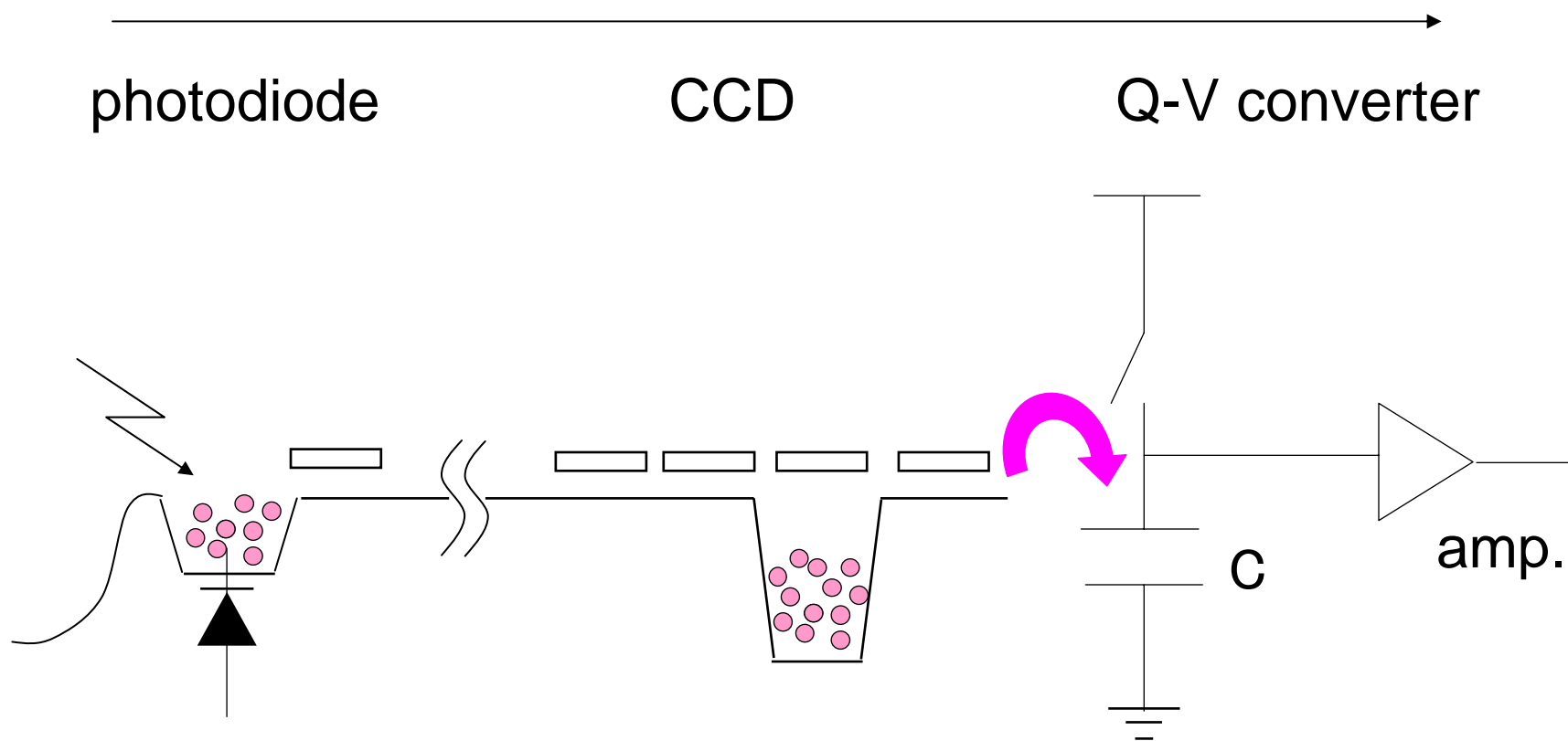
CCD (Charge-Coupled Device)



インターライン転送型CCDセンサ (IT-CCD)

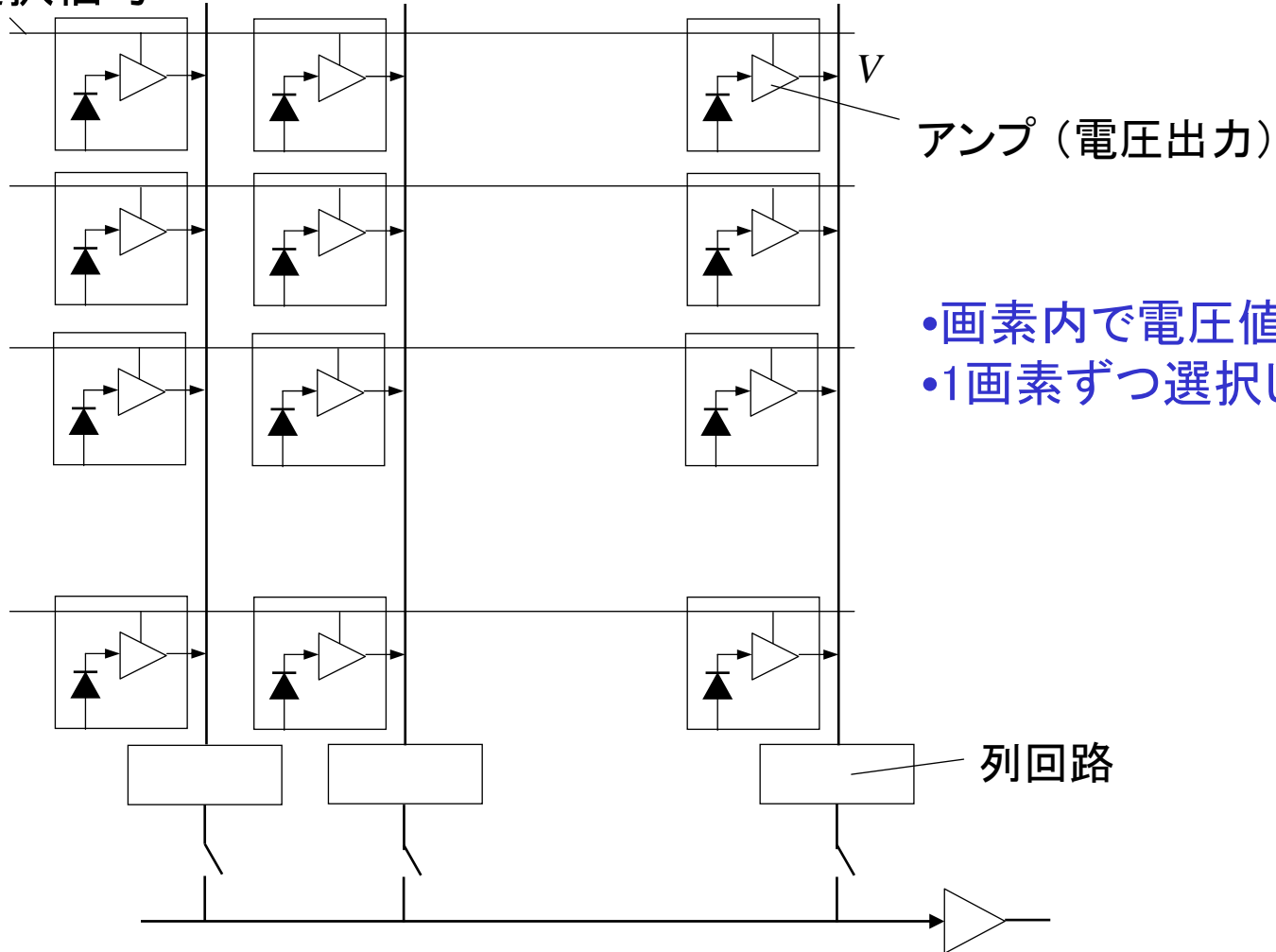


Signals in a CCD sensor



CMOS の場合

行選択信号

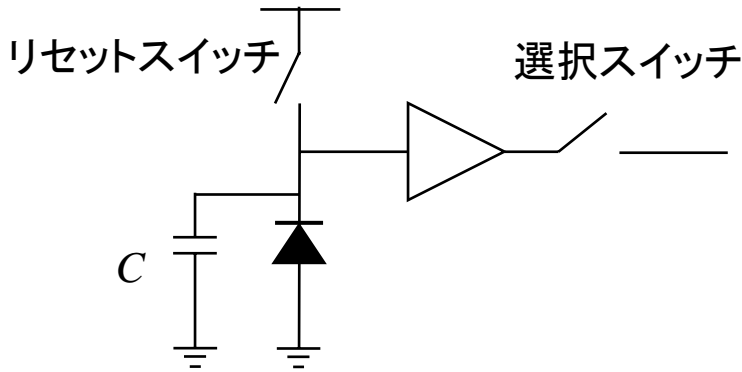


- 画素内で電圧値に変換
- 1画素ずつ選択して読み出す

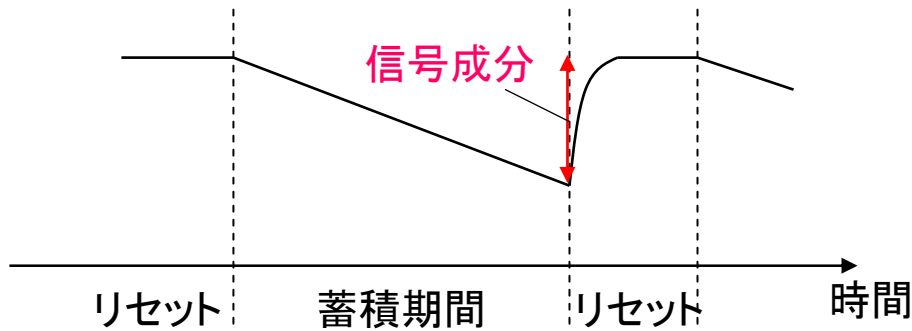
列回路

CMOS アクティブピクセルセンサ (APS)

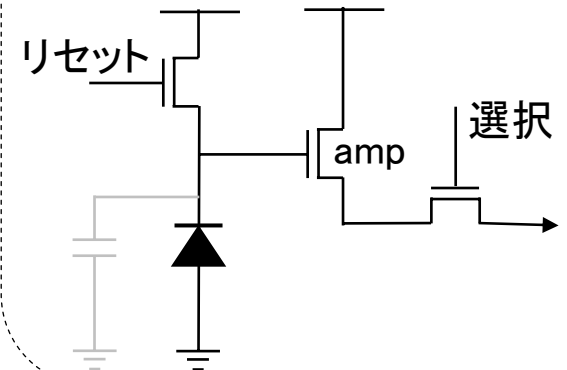
CMOS APS の画素構成



- 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)



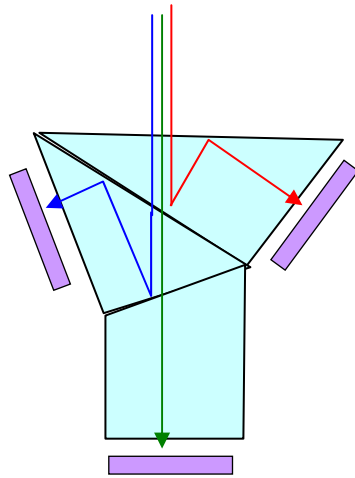
(詳細回路)
3トランジスタ APS



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

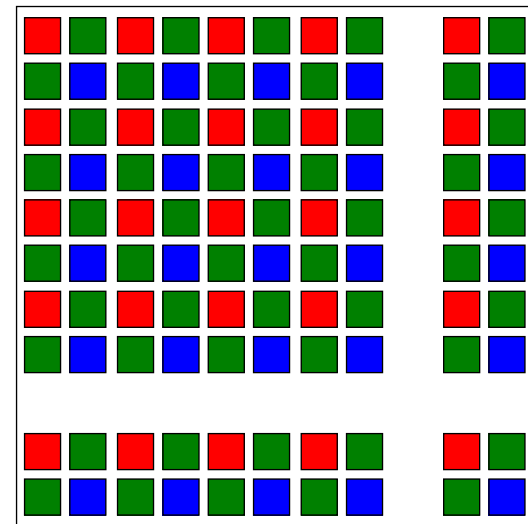


イメージセンサ x 3

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



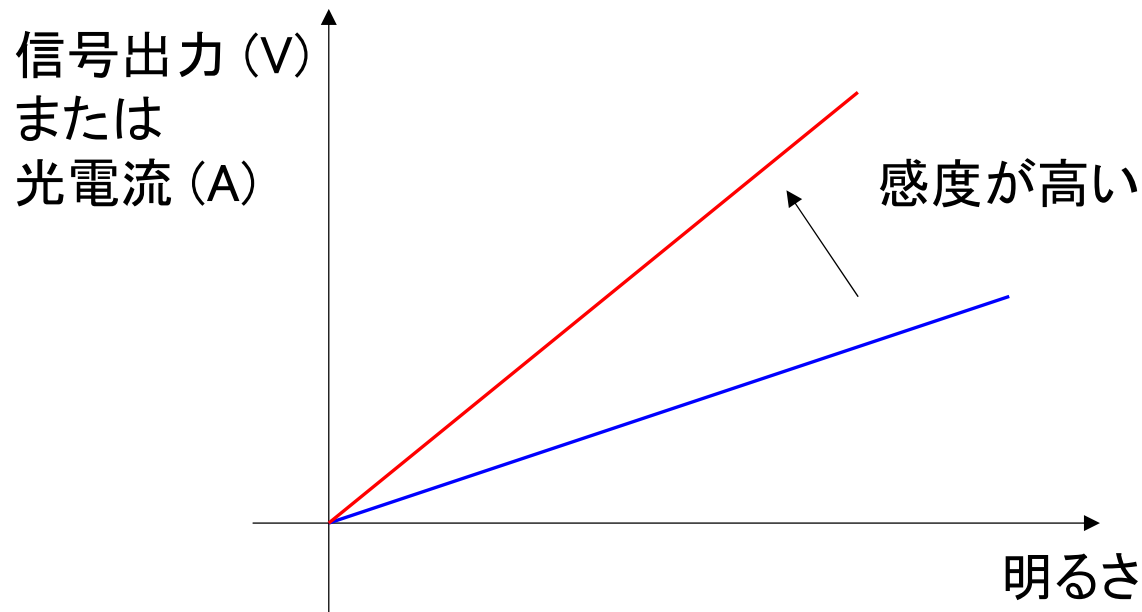
1つのイメージセンサ
画素ごとにカラーフィルタを並べる

性能は落ちる. コストは低い

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/m²]

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/m²]

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]

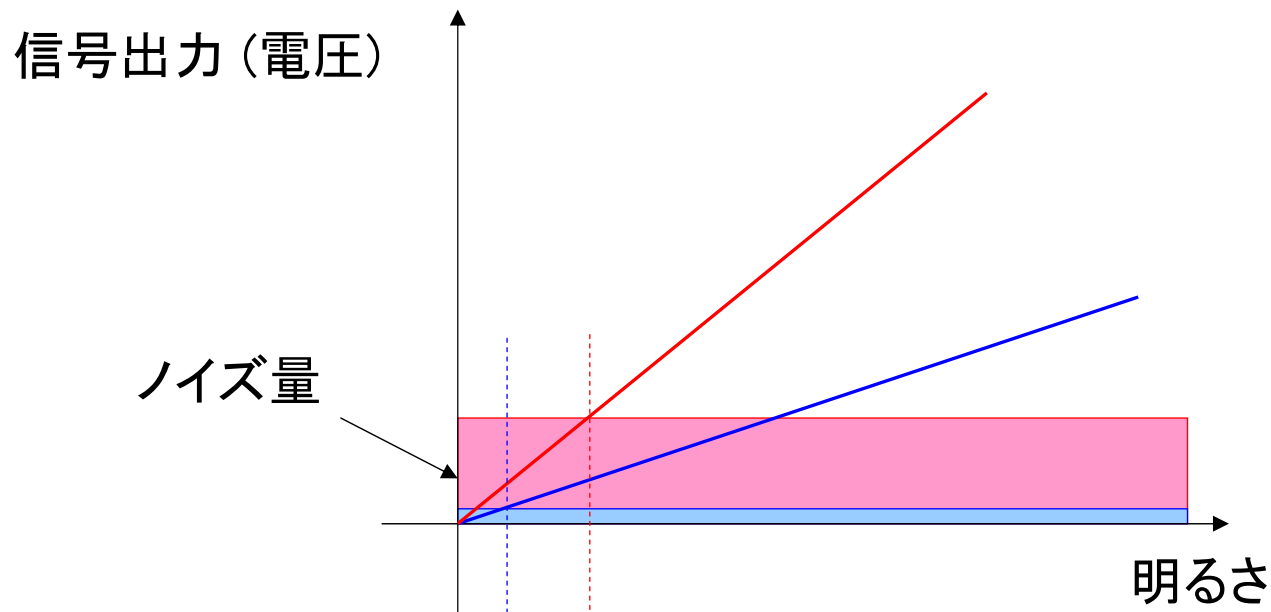
光度 [cd]

輝度 [cd/m²]

イメージセンサの感度は、例えば V/lx/s など

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

イメージセンサのノイズ源

フォトダイオード:

- 暗電流
- ショットノイズ
 - フォトンショットノイズ
 - 暗電流ショットノイズ

電荷転送:

- 残像

リセット:

- 熱ノイズ (kTCノイズ)

アンプ:

- 固定パターンノイズ (Fixed Pattern Noise: FPN)
- 熱ノイズ
- $1/f$ ノイズ

Shot Noise

Fluctuation in the number of the particles such as electrons and photons.

$$N_{\text{shot,rms}} = \sqrt{\bar{N}}$$

$N_{\text{shot,rms}}$: rms # of shot noise charges

\bar{N} : # of signal charges

Equivalently,

$$Q_{\text{shot,rms}} = \sqrt{e\bar{i}t_{\text{int}}}$$

e : electron charge

\bar{i} : average photocurrent plus dark current

t_{int} : integration time

This is fundamental noise and cannot be canceled or reduced.
All we can do is just to improve SNR through integration.

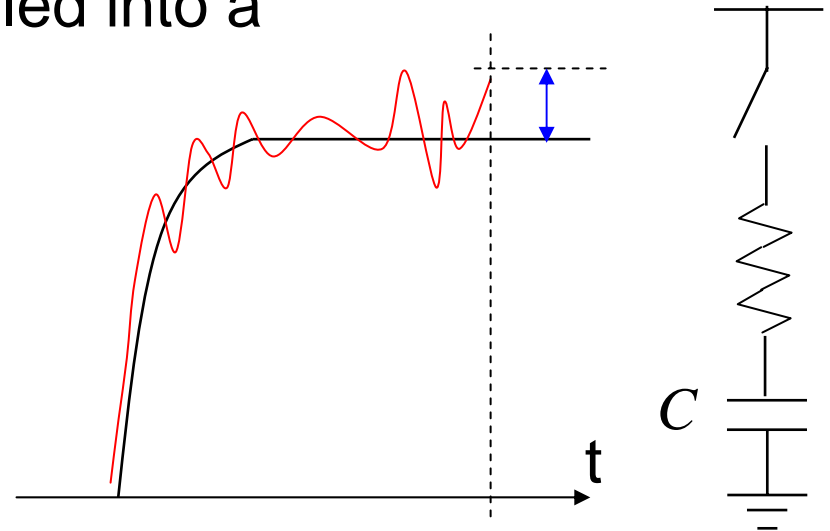
Reset Noise (kTC Noise)

Thermal noise (which is generated at on-resistance of a transistor) sampled into a capacitance C

$$Q_{\text{reset,rms}} = \sqrt{kTC}$$

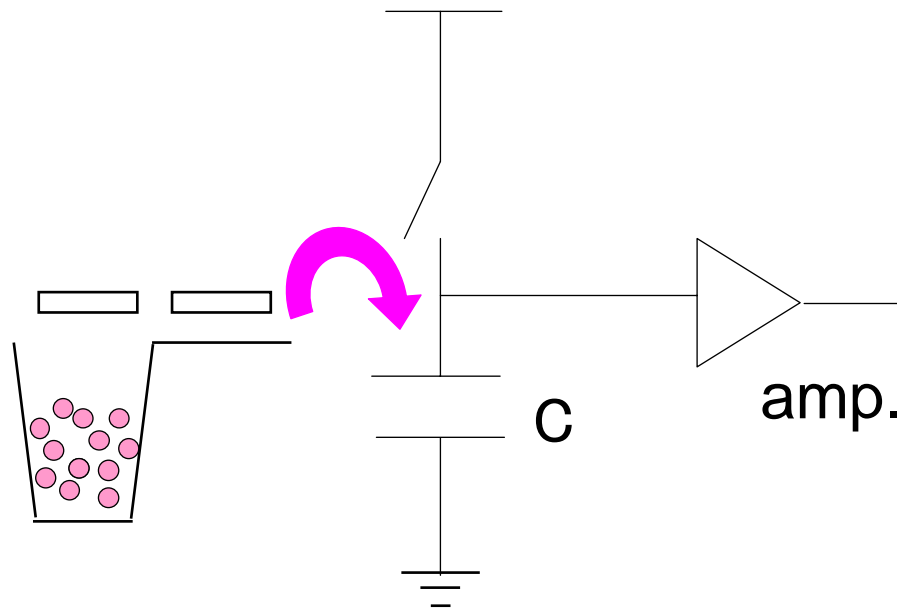
k : Boltzmann constant

T : absolute temperature



In CCD sensors, the Q-V converter amp suffers from the kTC, so a technique called Correlated Double Sampling (CDS) is applied

Correlated Double Sampling (CDS)



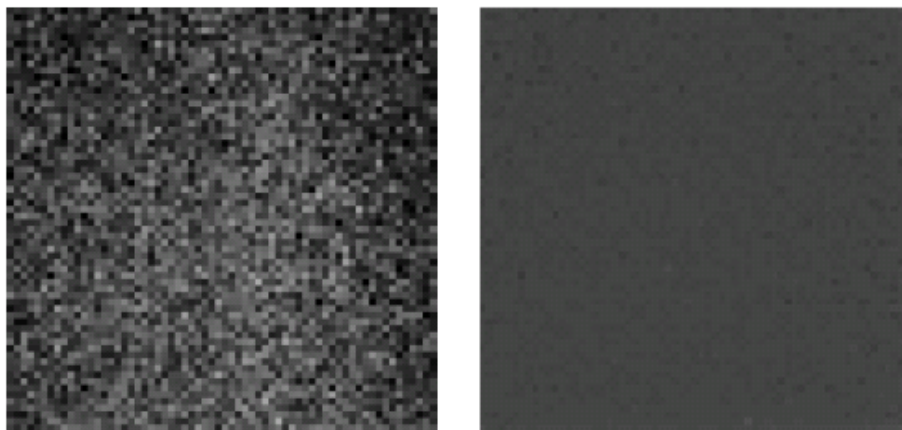
1. Reset the capacitor
2. Read the voltage (reset level)
3. Transfer the signal charges into the capacitor
4. Read the voltage (signal level)
5. Get the difference between the reset and signal levels

Fixed Pattern Noise (FPN)

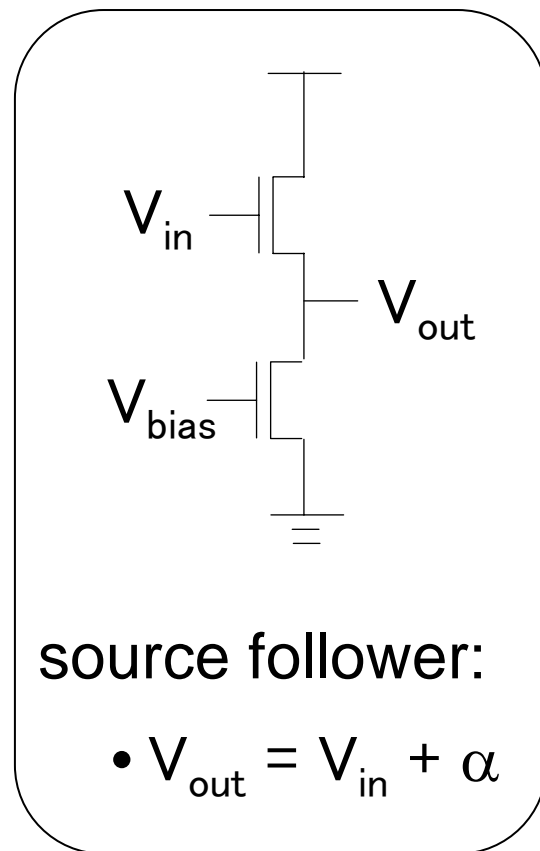
Non uniformity in offset voltages α of source follower amps:

$$V_{\text{FPN,rms}} = \text{const.}$$

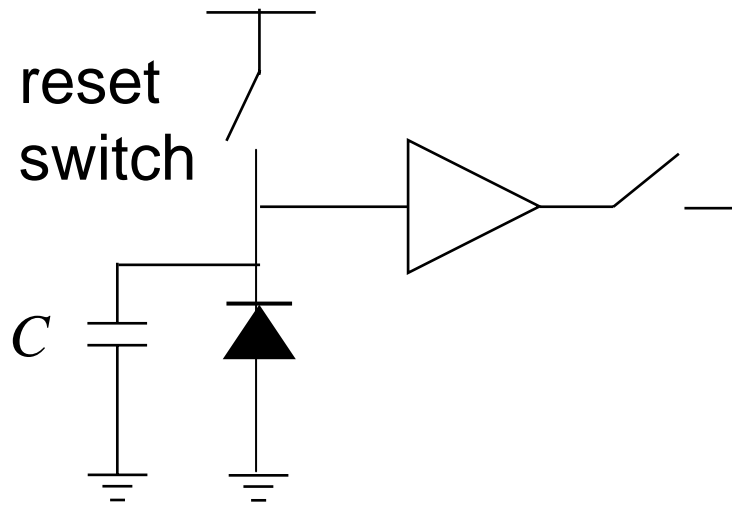
In CMOS sensors, FPN is generated at the pixel amp., which can be reduced using CDS



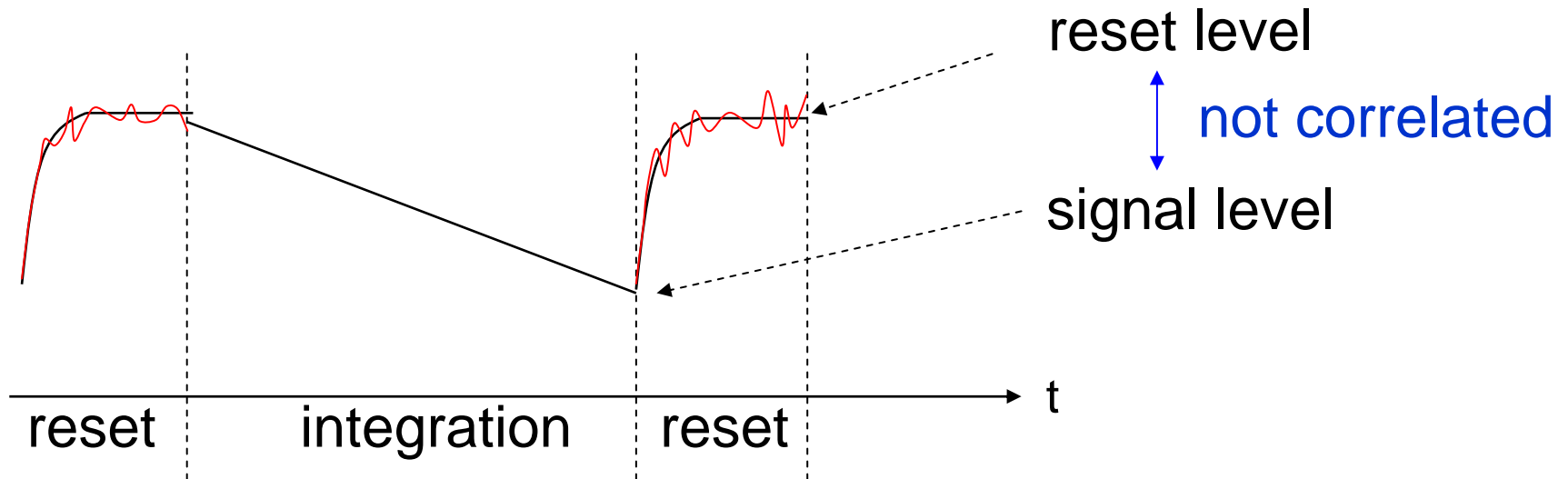
Example from Takeuchi et al. (2004)



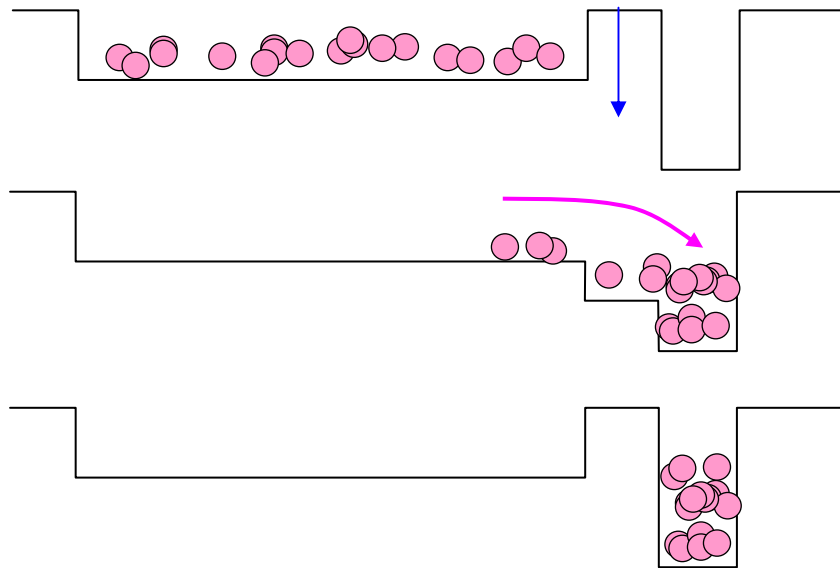
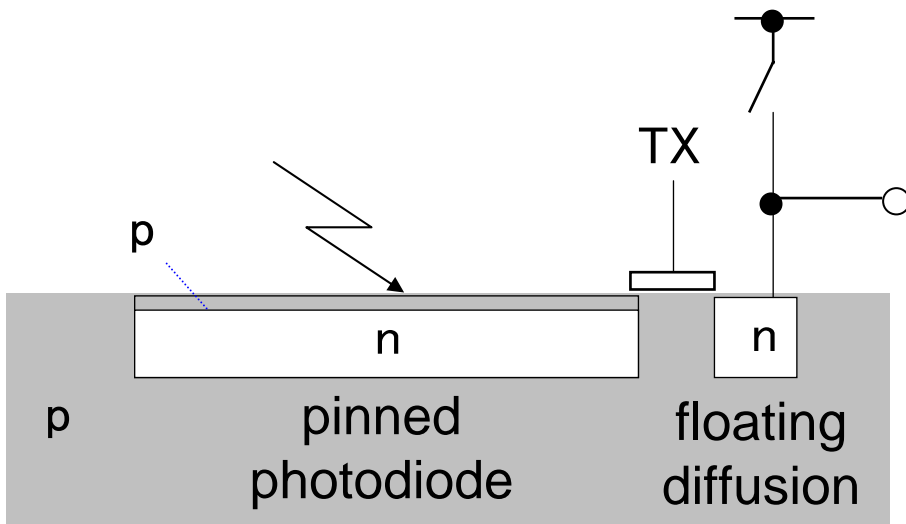
CDS in 3T-APS



- kTC noise cannot be canceled with CDS in 3T-APS CMOS sensors
- actually, kTC noise is doubled when CDS is applied!



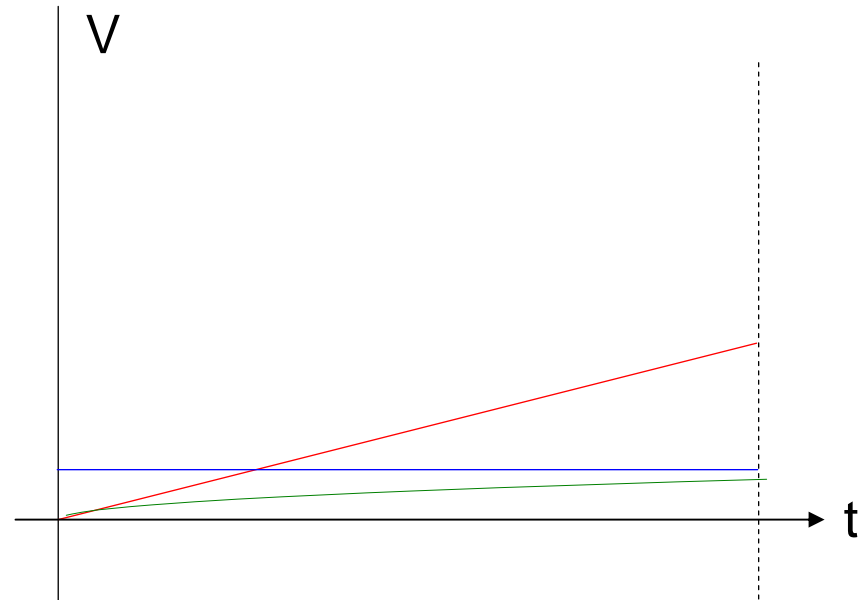
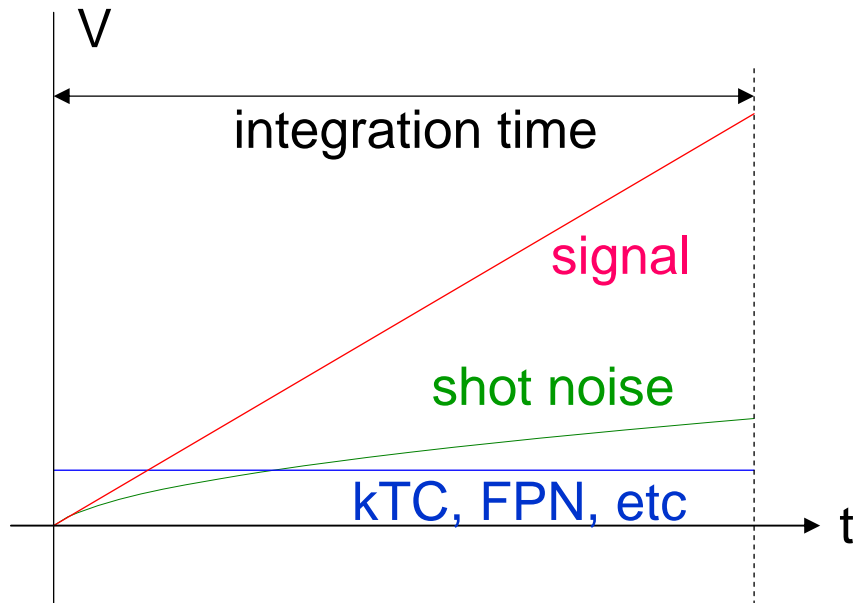
4-transistor APS



1. reset the floating diffusion node
2. read the reset level
3. transfer the signal charges
4. read the signal level
5. get the difference

- Photodiode with a special structure is required
- It also helps to reduce dark current and to improve sensitivity

Noise and Integration time



$$V_{\text{shot,rms}} = \frac{Q_{\text{shot,rms}}}{C} = \frac{\sqrt{e i t}}{C}$$

$$V_{\text{reset,rms}} = \sqrt{\frac{kT}{C}}$$

$$V_{\text{FPN,rms}} = \text{const.}$$

By making the integration time N times longer, SNR is multiplied by:

- \sqrt{N} w.r.t shot noise
- N w.r.t. FPN, kTC noise

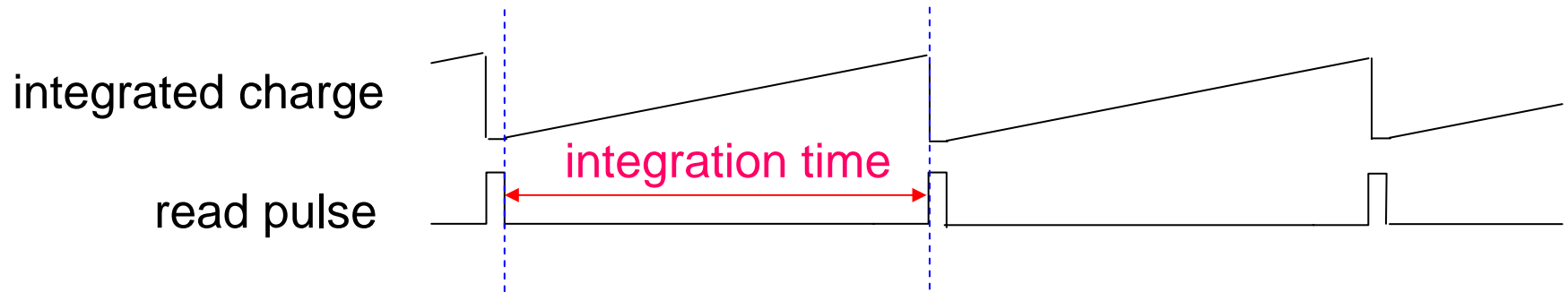
スミア (CCDセンサに特有)



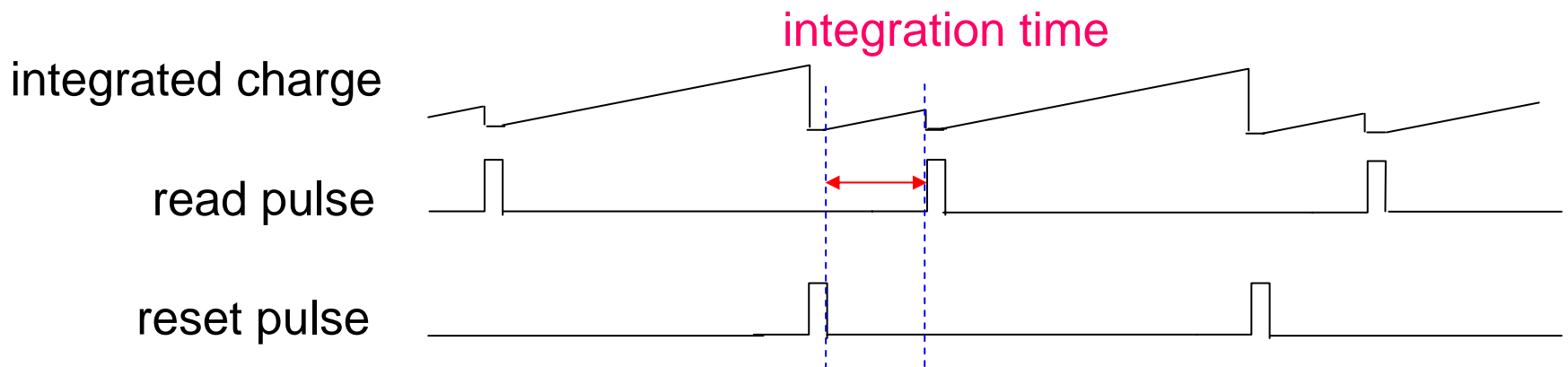
- 明るい部分の上下に縦に白いラインが発生
- 垂直CCDへの電荷混入が原因

電子シャッタ

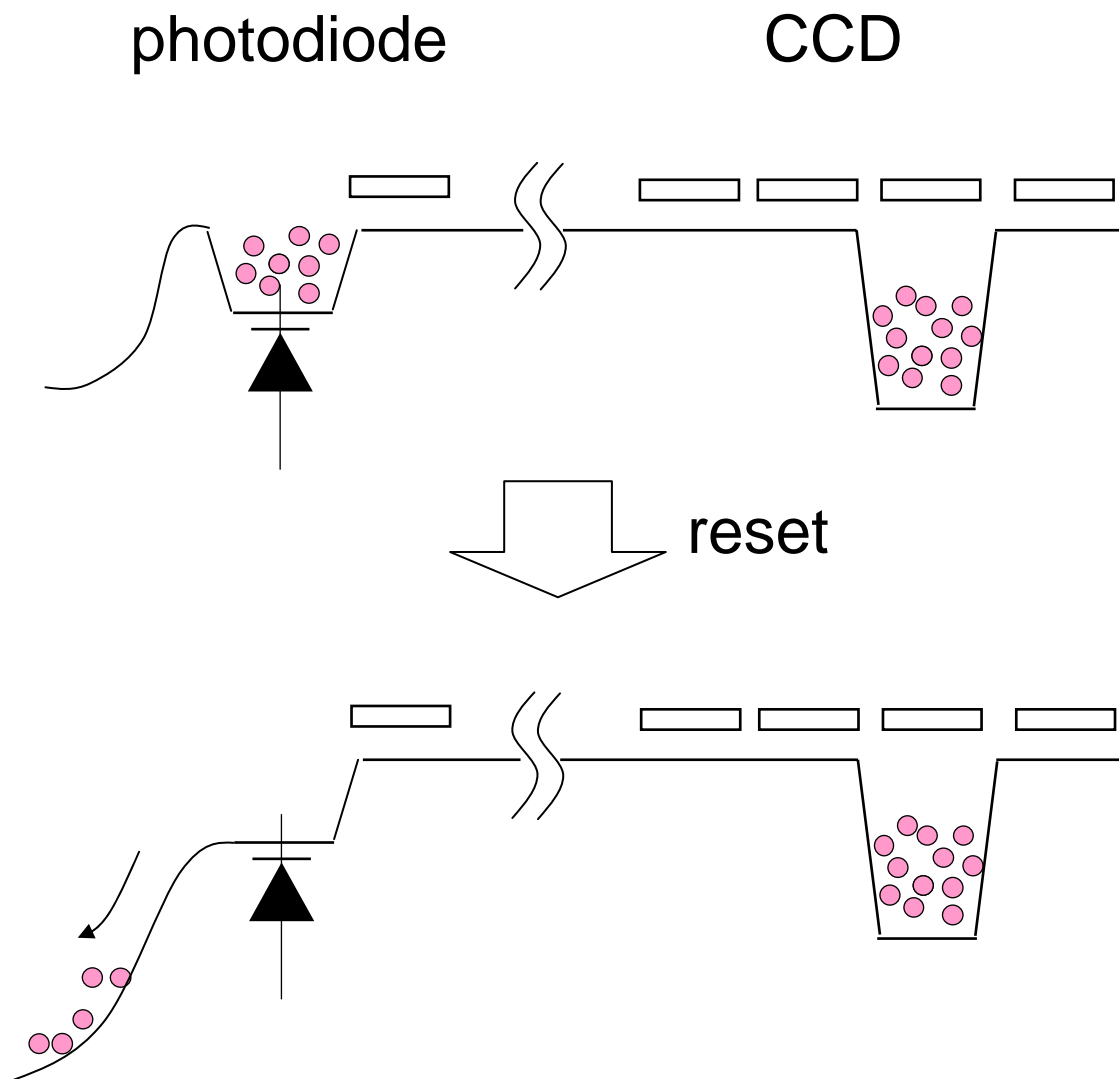
IT-CCD (w/o electronic shutter):



IT-CCD (with electronic shutter):

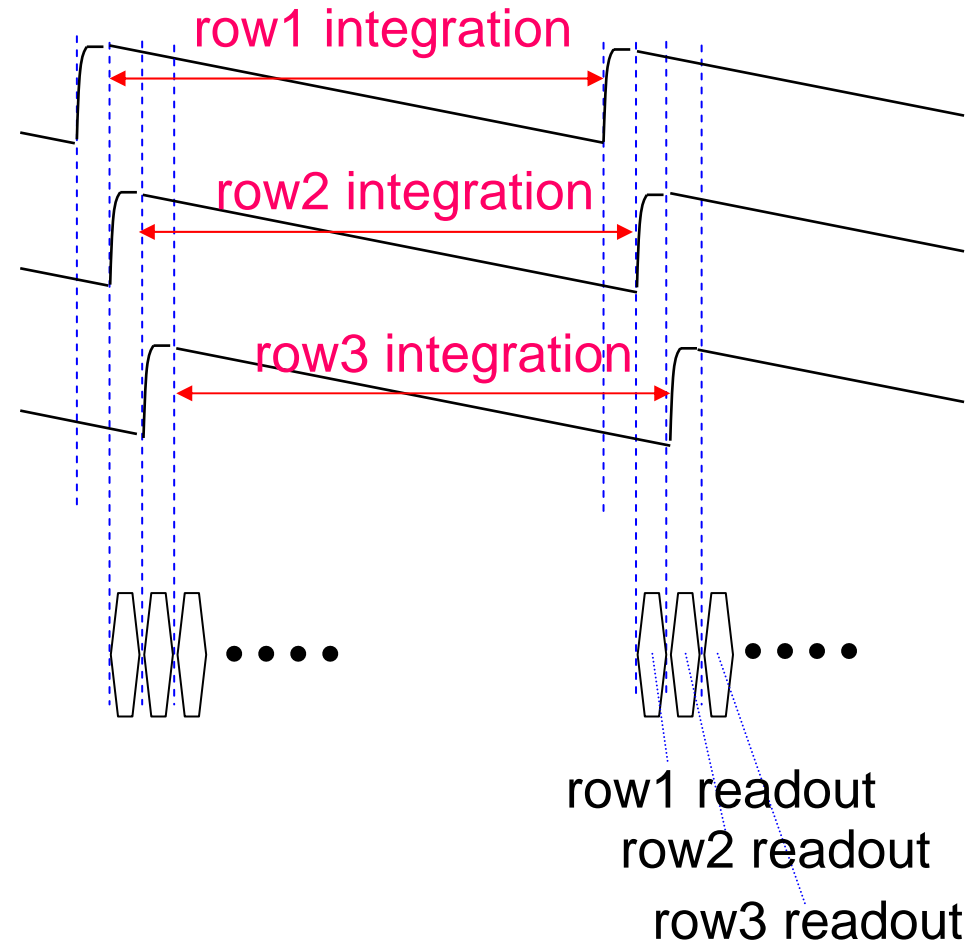
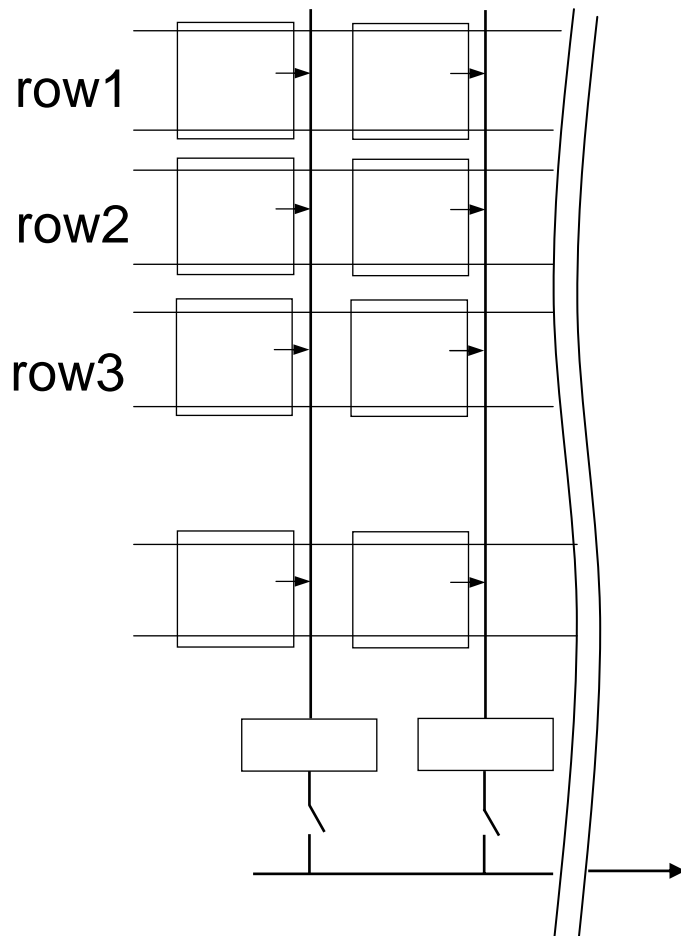


Resetting in IT-CCD



Rolling shutter mode

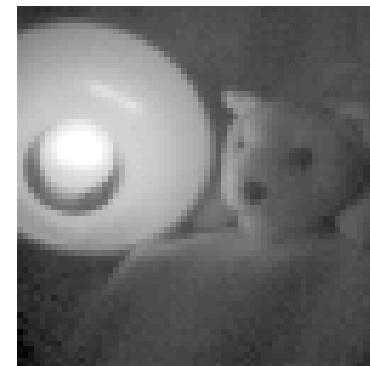
While IT-CCDs operate in the **global shutter mode**,
3T-APS CMOS sensors operate in the **rolling shutter mode**



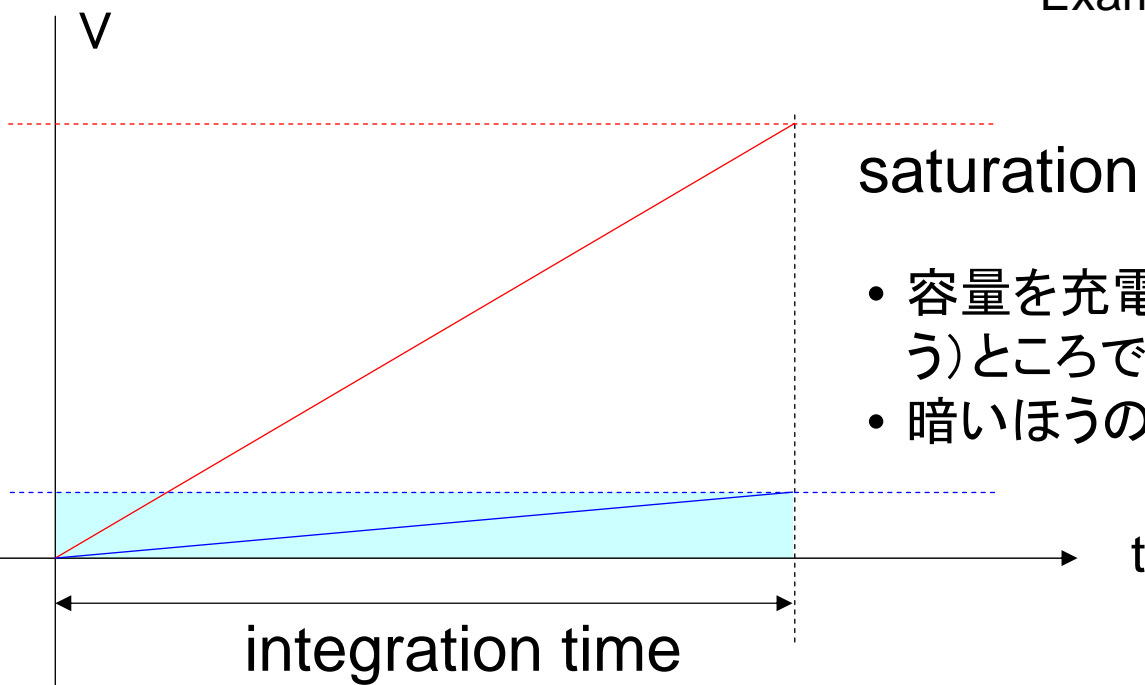
ダイナミックレンジ

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

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

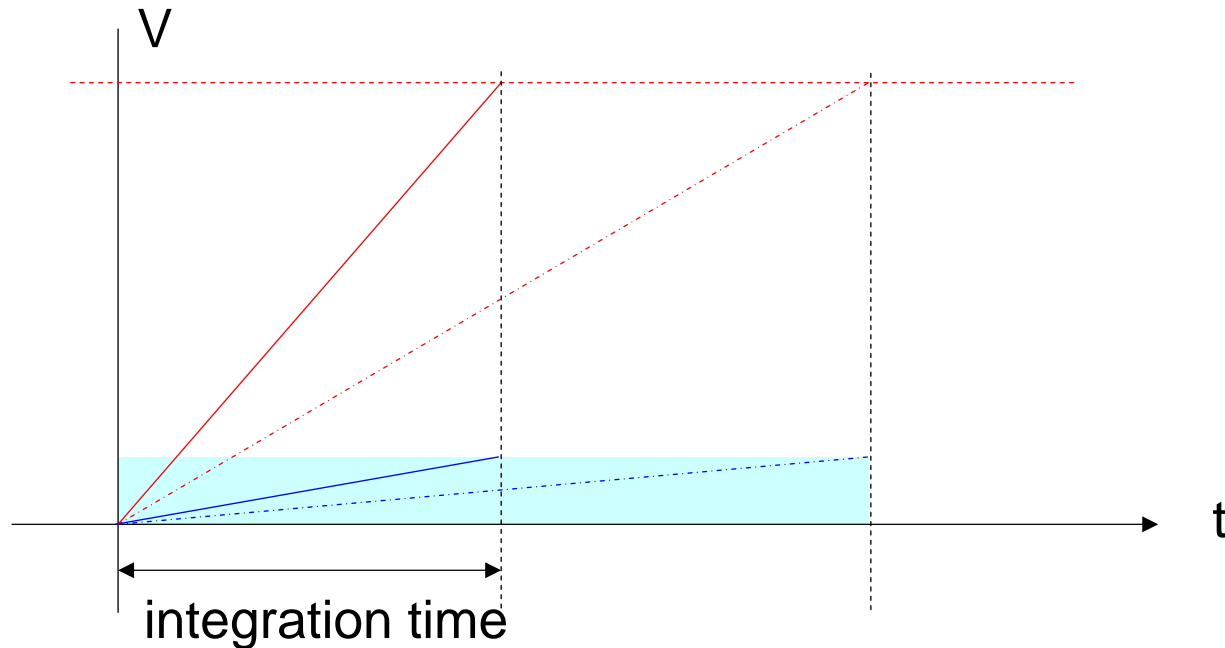


Example from Kagami et al. (2003)



- 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

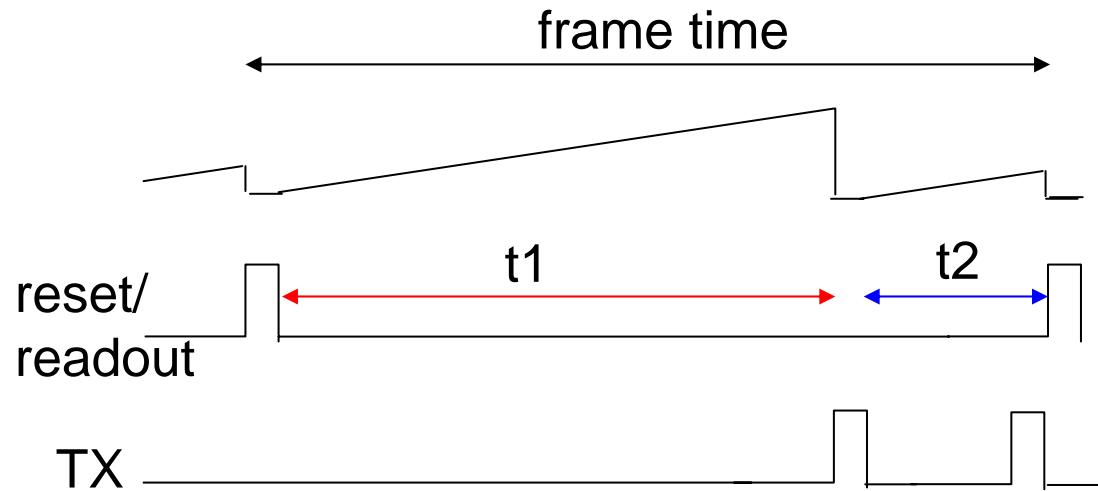
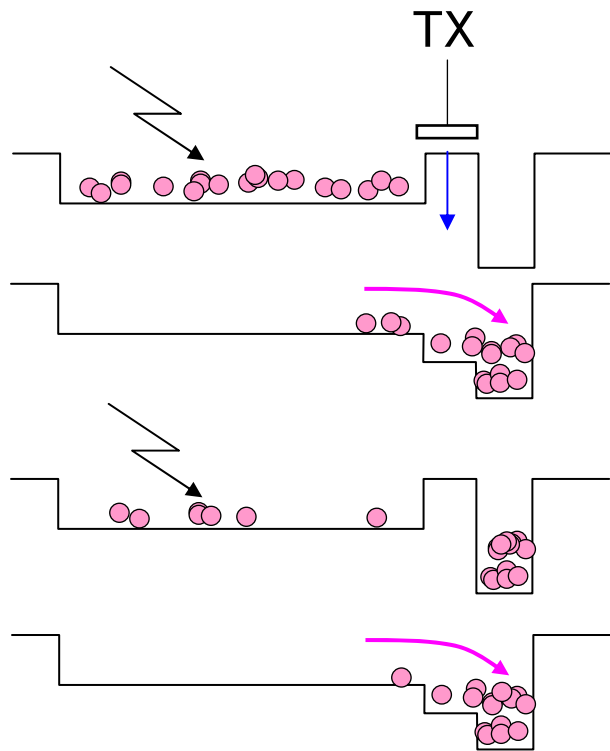
Dynamic range and Integration time



Simply modifying the integration time will not contribute to dynamic range enhancement.

Commonly used techniques utilize multiple integration times.

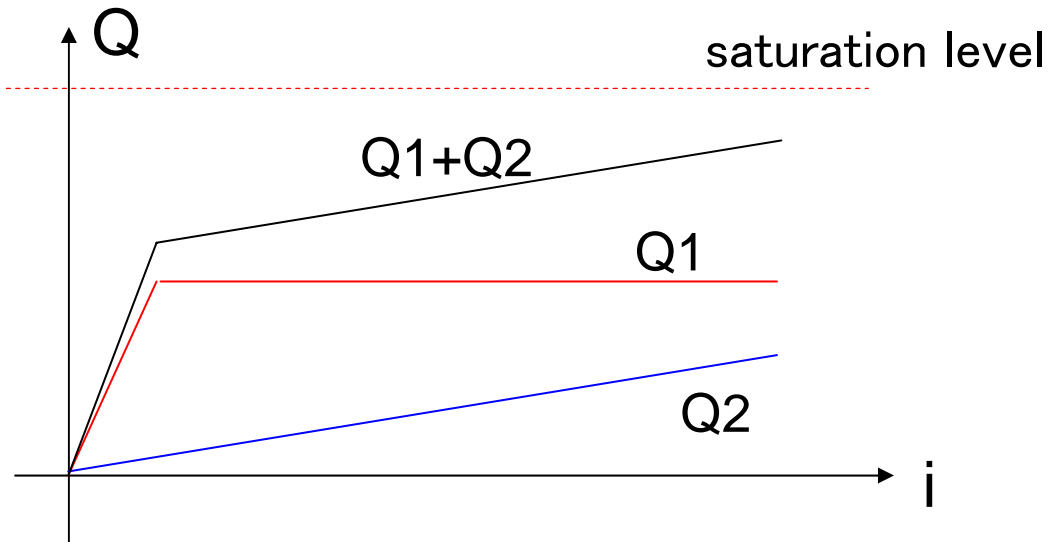
Example from Micron MT9V403



$$Q_1 = \max(Q_{\max}, it_1)$$

$$Q_2 = \max(Q_{\max}, it_2)$$

$$Q = Q_1 + Q_2$$



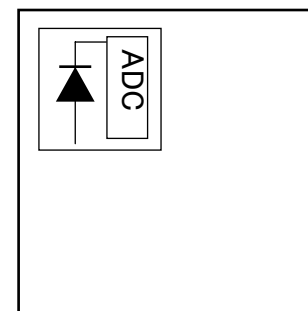
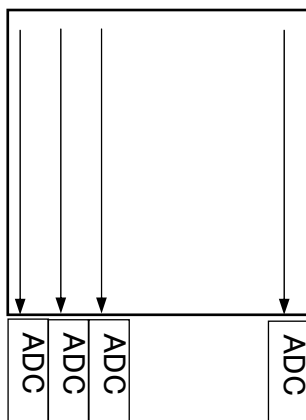
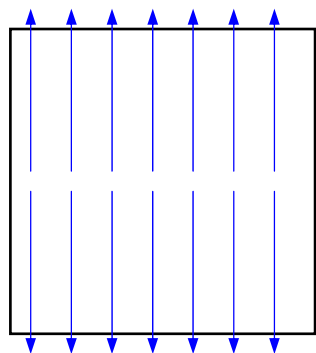
空間解像度

- 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 和也: CCD/CMOSイメージ・センサの基礎と応用, CQ出版社, 2003.
- 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.