
知能制御システム学

CMOSイメージセンサ: 発展編

東北大学 大学院情報科学研究科

鏡 慎吾

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

2005.06.14

今日の目的

- 前回学んだイメージセンサの基礎技術を踏まえて、イメージセンサの高性能化のための先端技術について学ぶ
- 主に CMOS イメージセンサ
- 視覚処理関連はまた今度

[米本2003] [Wong1999]

復習: 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

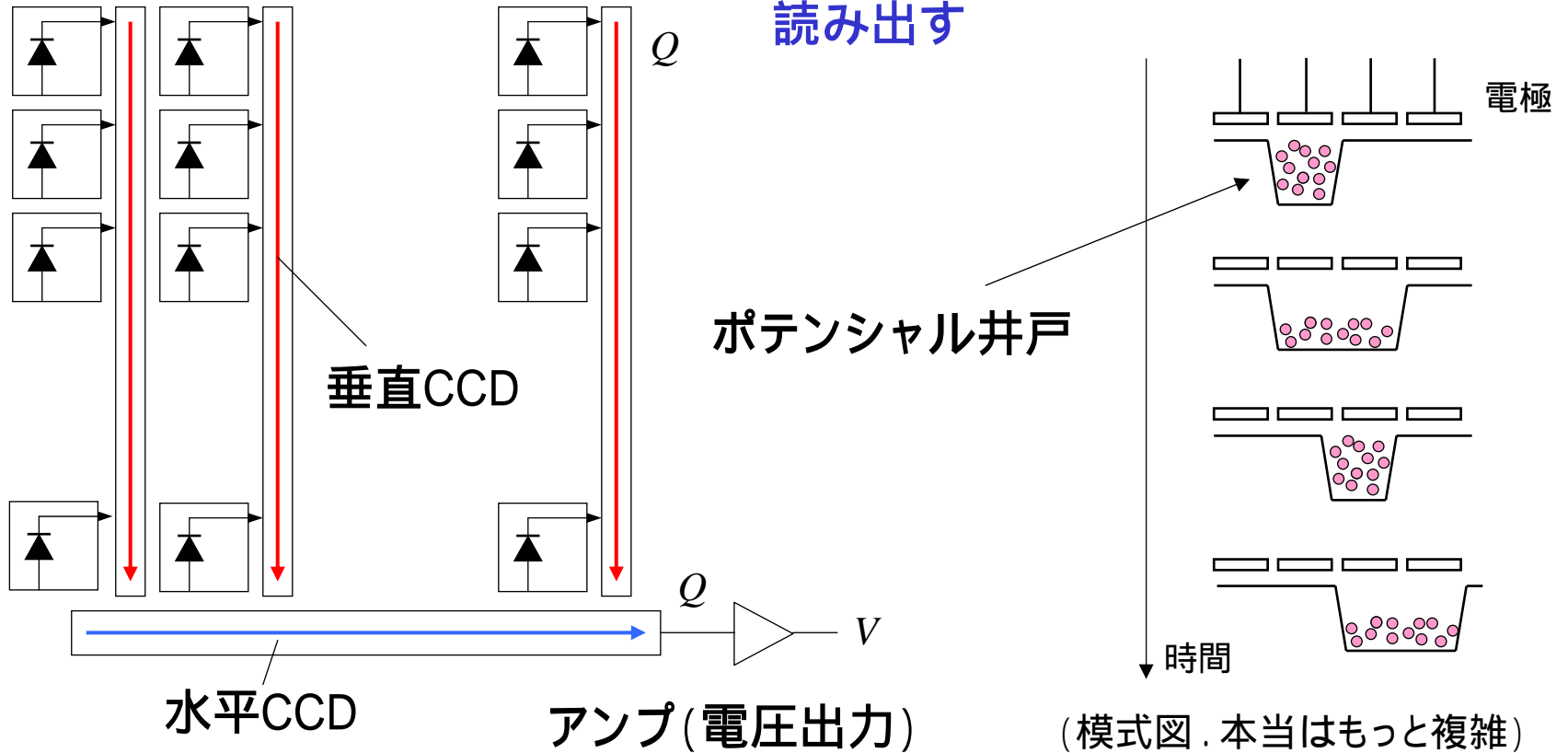
消費電力が小さい

機能化が容易

復習: CCD の場合

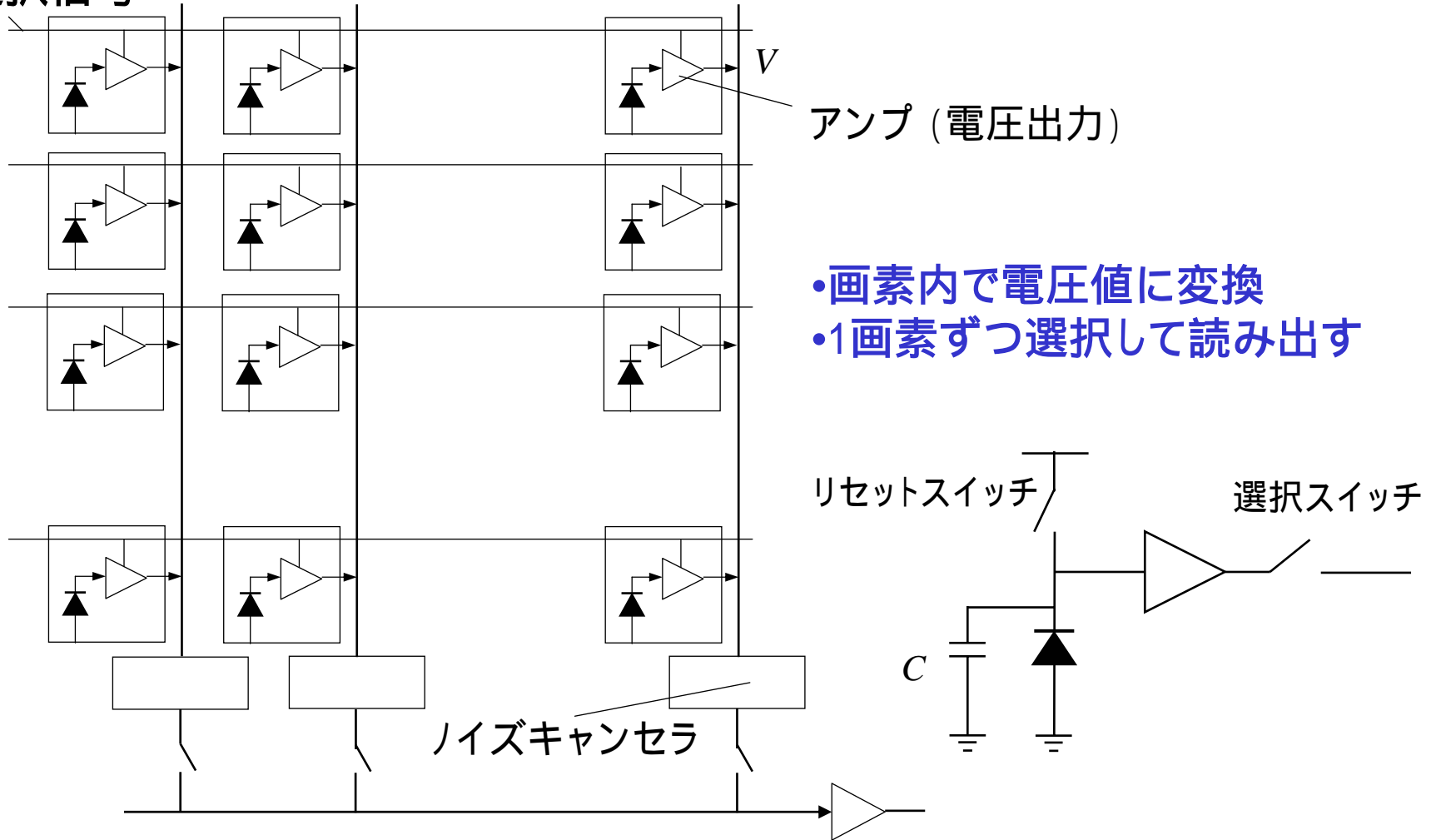
(インターライン転送型CCD)

- 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



復習: CMOS の場合

行選択信号



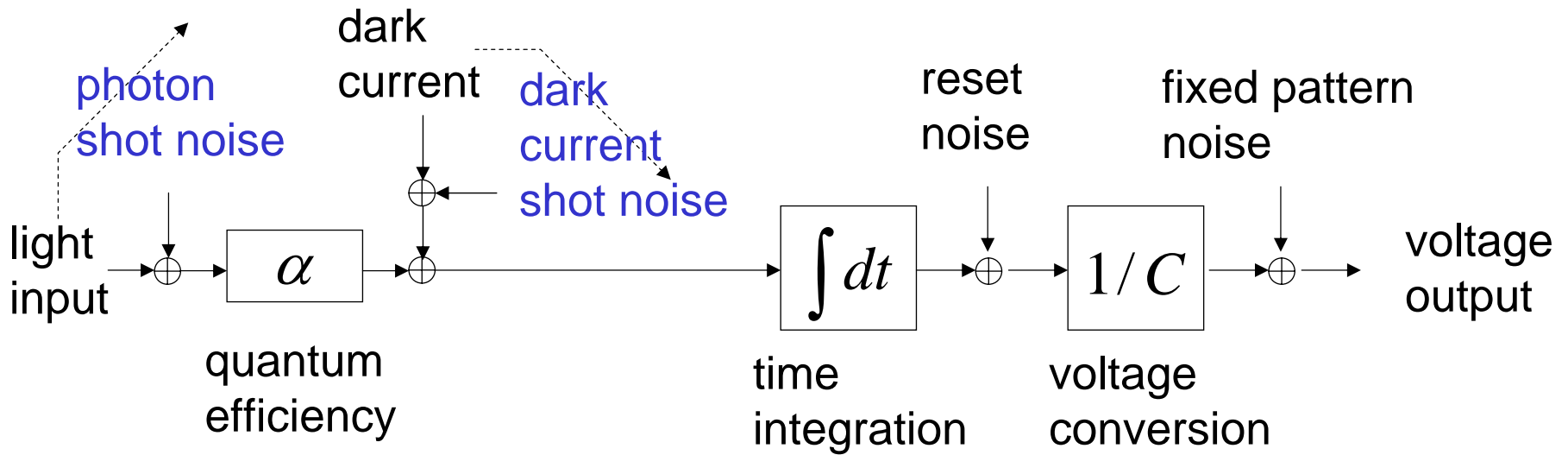
CMOS アクティブピクセルセンサ (APS)

鏡 慎吾 (東北大学): 智能制御システム学 2005.06.14

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（後日）

CMOS イメージセンサの信号過程



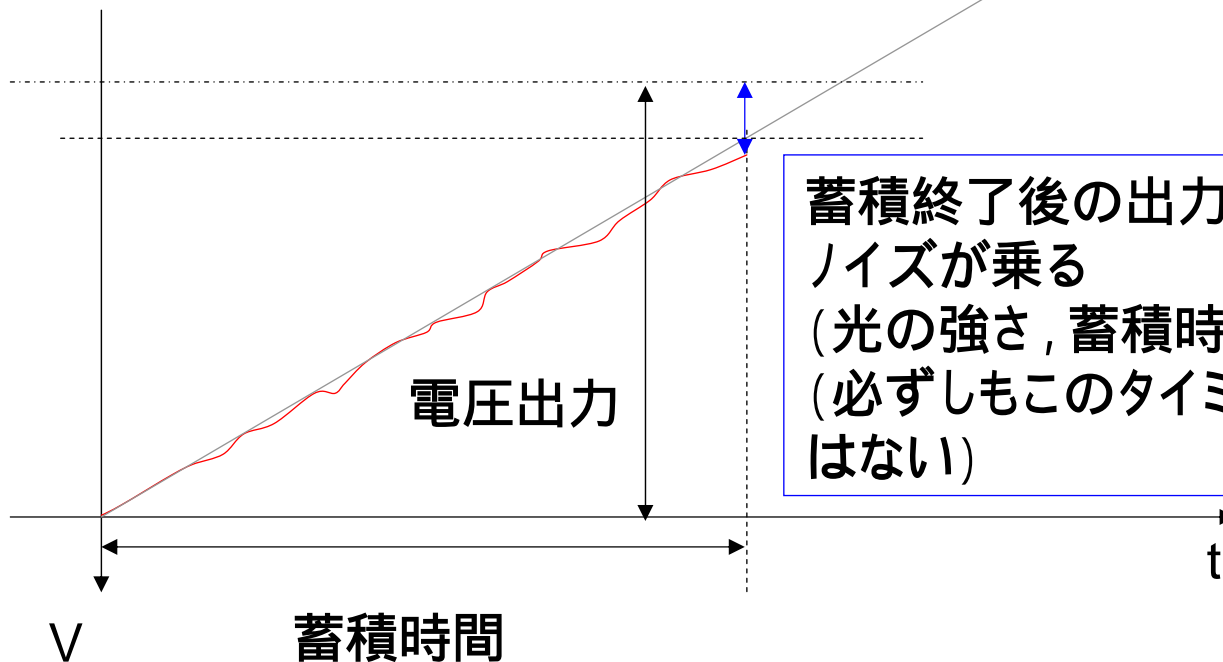
$$V_{\text{out}} = \frac{(i_{\text{ph}} + i_{\text{d}})t + Q_{\text{shot}} + Q_{\text{reset}}}{C} + V_{\text{FPN}}$$

$$\overline{Q_{\text{shot}}^2} = (i_{\text{ph}} + i_{\text{d}})t \quad V_{\text{FPN}} : \text{デバイスの特性で決まる}$$

$$\overline{Q_{\text{reset}}^2} = kTC$$

直感的捉え方

光が強いと傾きが急
傾きはふらつく
(ふらつき方は光の強さに依存)



蓄積終了後の出力に、電圧方向の
ノイズが乗る
(光の強さ、蓄積時間に依存しない)
(必ずしもこのタイミングで乗るというわけ
ではない)

感度

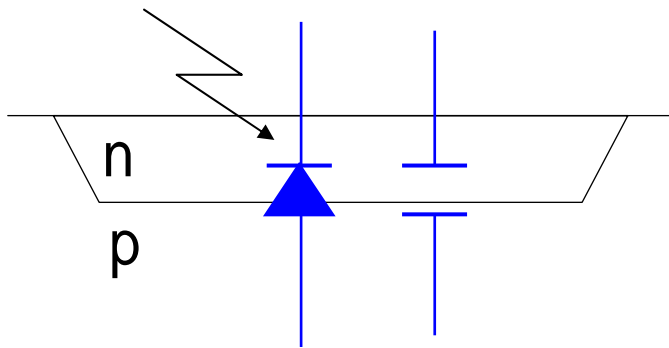
$$V_{\text{out}} = \frac{(i_{\text{ph}} + i_{\text{d}})t + Q_{\text{shot}} + Q_{\text{reset}}}{C} + V_{\text{FPN}}$$

$$i_{\text{ph}} \propto \alpha$$

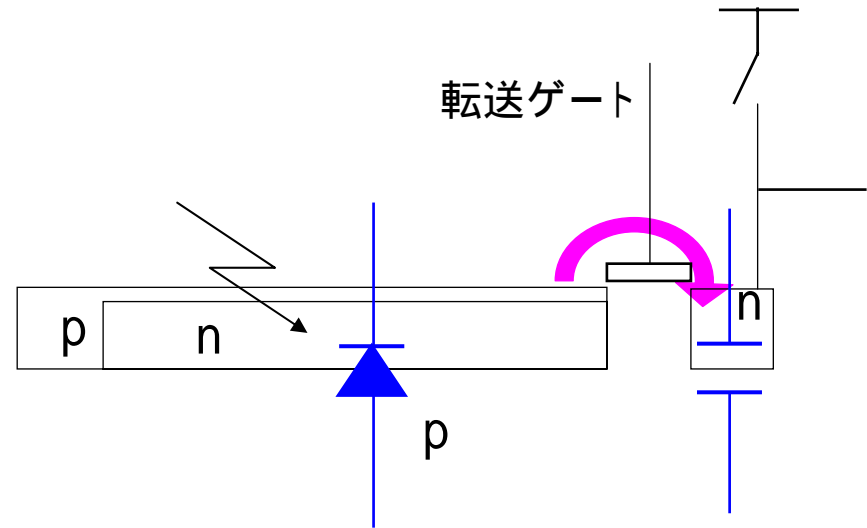
α / C で決まることになる

- フォトンを変換する効率を上げる (プロセス)
- 開口率が大きいほどよい
- しかし, PN接合フォトダイオードの寄生容量を C として使う場合は, フォトダイオードを大きくした分 C も大きくなってしまう
- よって, 埋め込みフォトダイオードなどのように, C を別に取り除く構造が有利

C を別に取りれる構造



PN接合フォトダイオード



埋め込みフォトダイオード

ノイズ

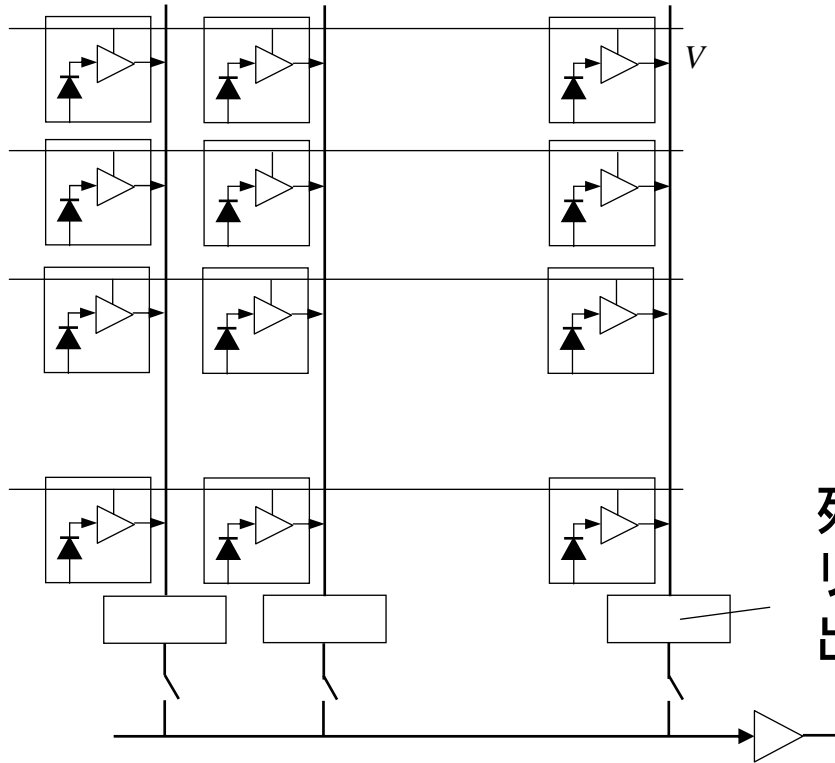
$$V_{\text{out}} = \frac{(i_{\text{ph}} + i_{\text{d}})t + Q_{\text{shot}} + Q_{\text{reset}}}{C} + V_{\text{FPN}}$$

$$\overline{Q_{\text{shot}}^2} = (i_{\text{ph}} + i_{\text{d}})t$$

$$\overline{Q_{\text{reset}}^2} = kTC$$

- フォトンショットノイズ: 基本的にどうしようもない 蓄積時間を長く取る
- 暗電流ショットノイズ: 暗電流を減らす (プロセス技術, 例: 埋め込みフォトダイオード)
- 固定パターンノイズ: 相関二重サンプリングによって除去可能
- リセットノイズ: 画素内で電荷転送する構造の場合は, 相関二重サンプリングで除去可能

相関二重サンプリング

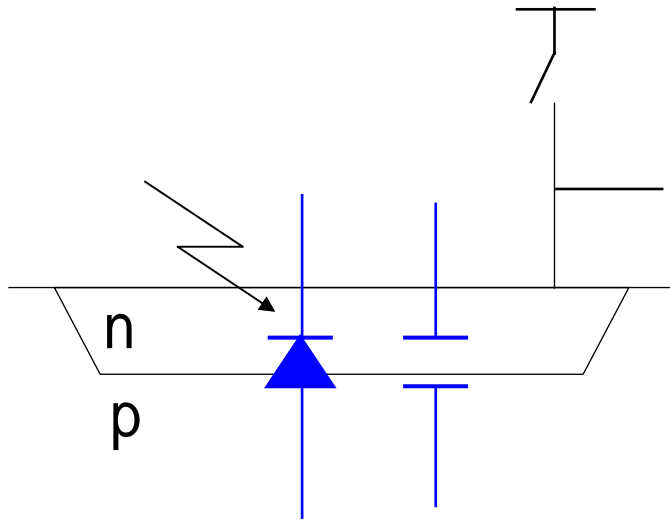


列回路:
リセットレベルと信号レベルの2回を読み
出して、差分を出力

列回路同士のばらつきも問題になる

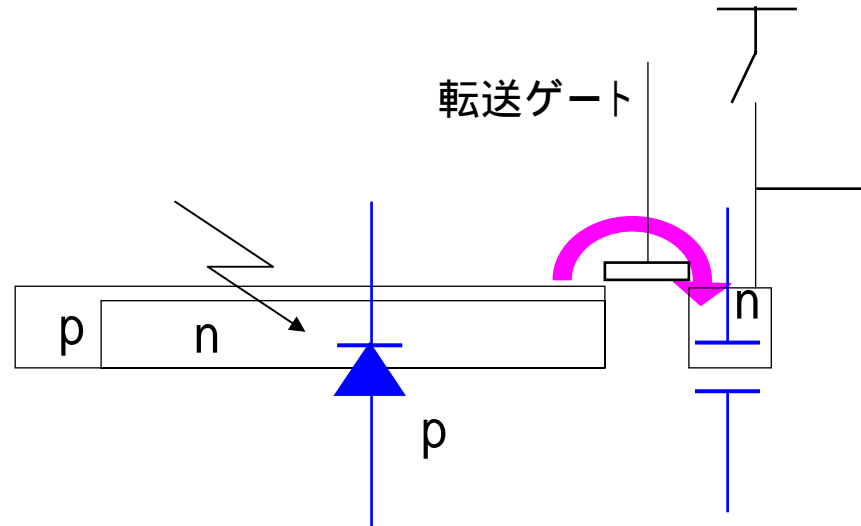
- 出力回路に工夫をする
- そもそも列回路を使わない
- 電荷領域で差分を取る

リセットノイズを除去できる構造



PN接合フォトダイオード

「蓄積期間終了時」と
その直後の「リセット後」の
差分しか取れない



埋め込みフォトダイオード

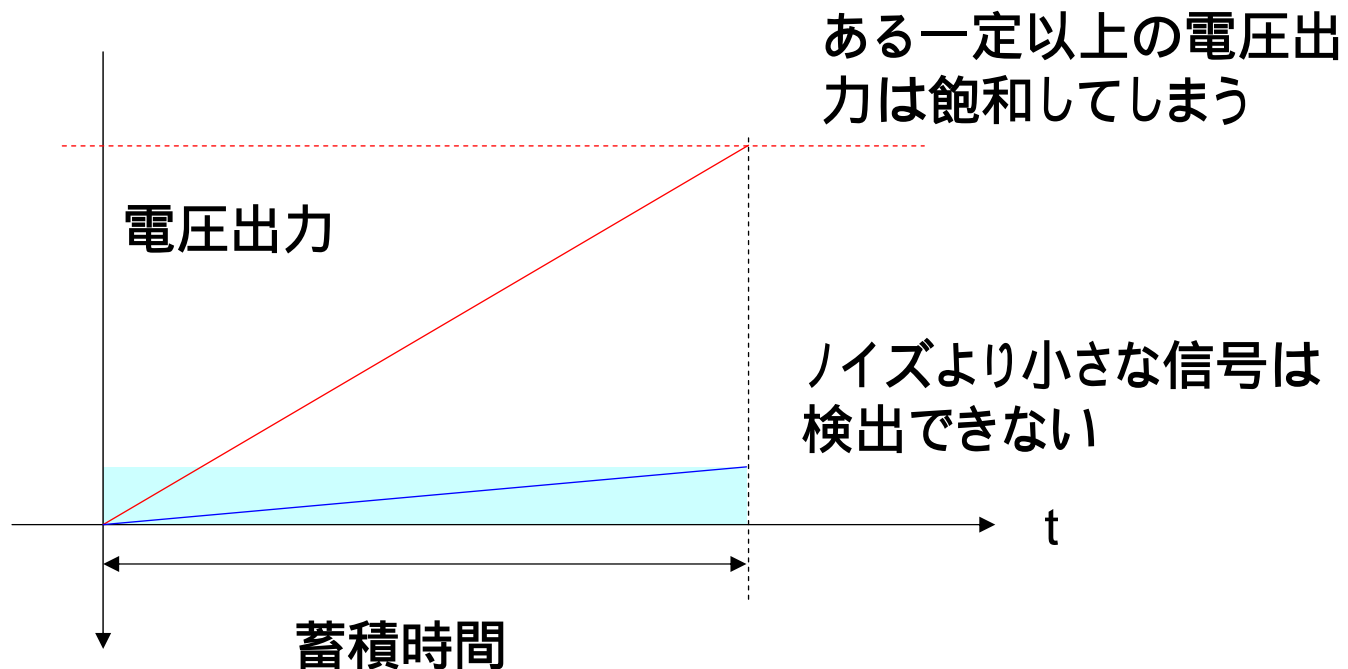
蓄積期間が終了してから
「電荷転送前」と「電荷転送後」の
差分を取れる

(蓄積期間中には他の画素をスキャンしなければならない点に注意)

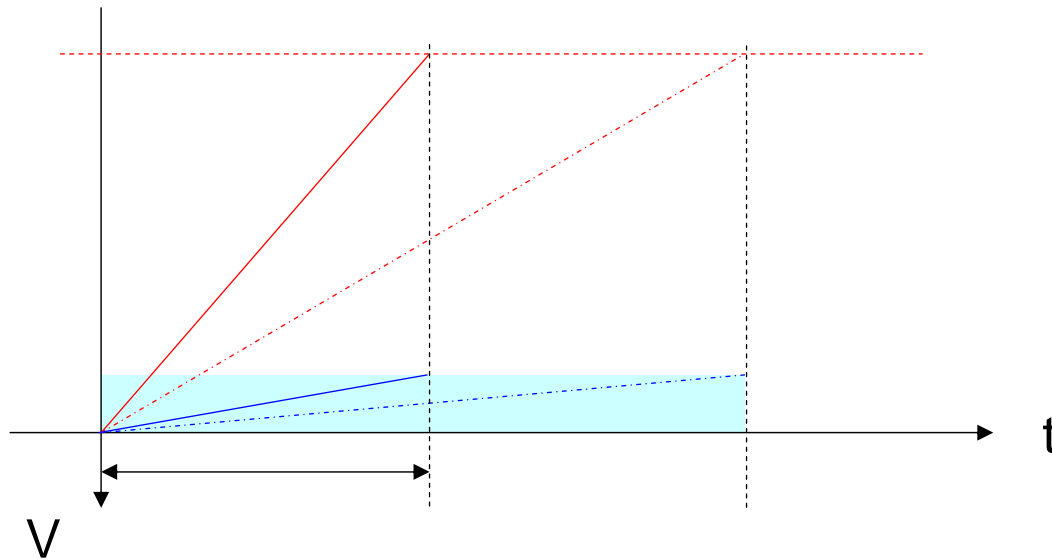
ダイナミックレンジ

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

$$DR [dB] = 20 \log \frac{i_{\text{upper}}}{i_{\text{lower}}}$$



例



蓄積時間を半分にした

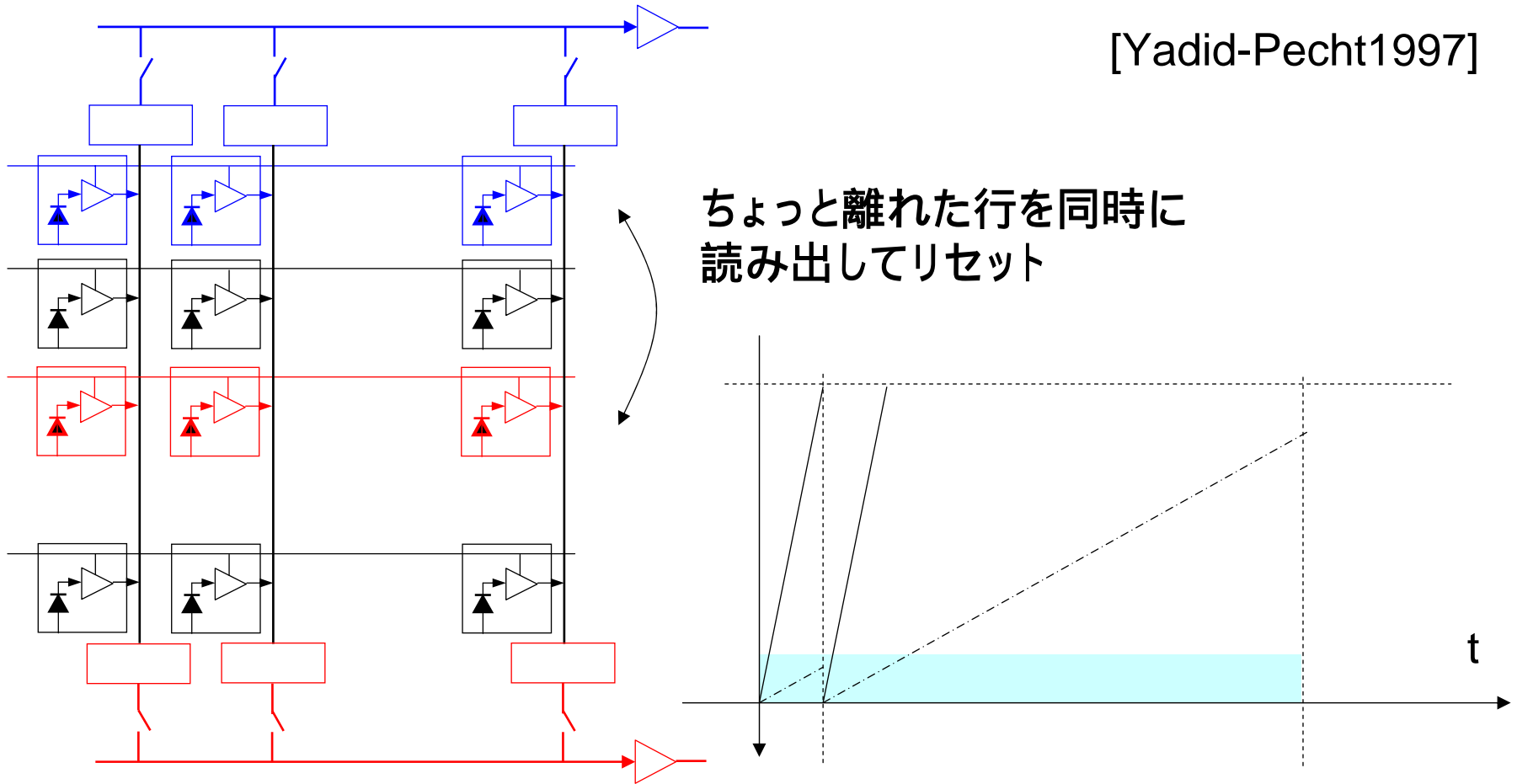
(ノイズレベルが一定だとすると) 上限は確かに2倍になったが、
下限も2倍になってしまった。ダイナミックレンジ変わらず。

長い蓄積時間と短い蓄積時間を両方使って、必要に応じて合成できればよいのだが？

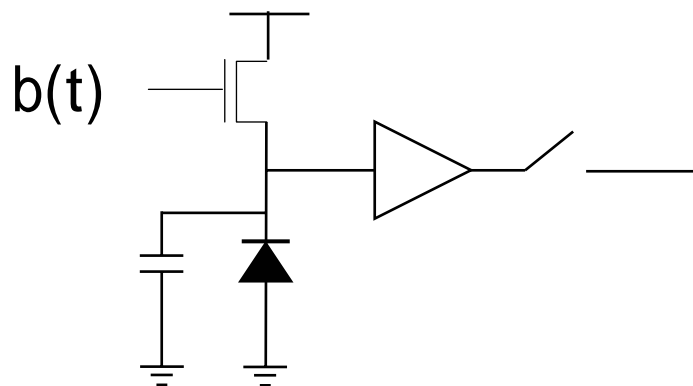
デュアルサンプリング

長い蓄積時間と短い蓄積時間の2種類で撮像した結果を組み合わせる

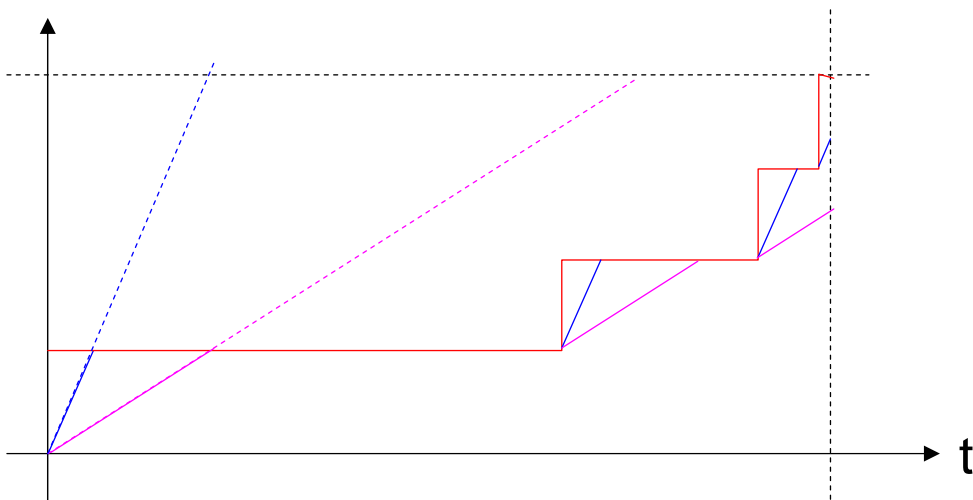
[Yadid-Pecht1997]



蓄積容量変調型

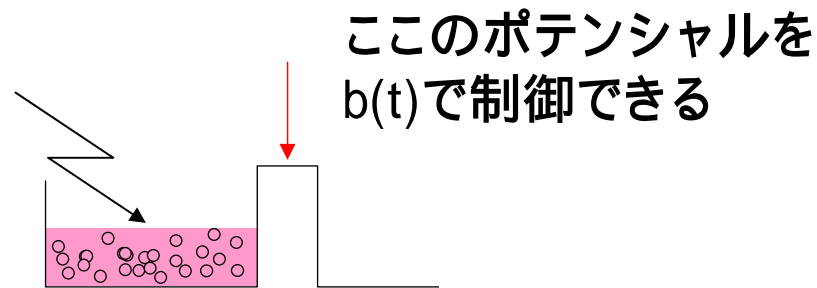


蓄積容量を変化させて余分な電荷を捨てながら、蓄積時間を使い切る

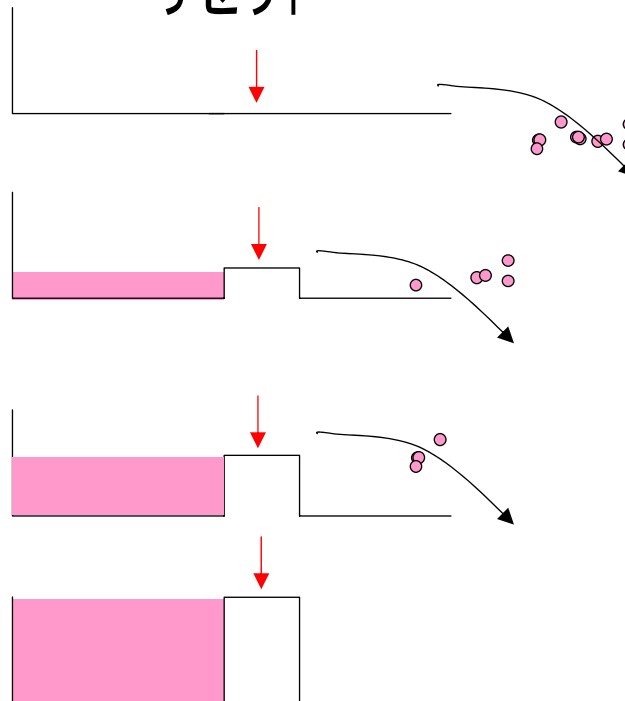


[Decker1998]

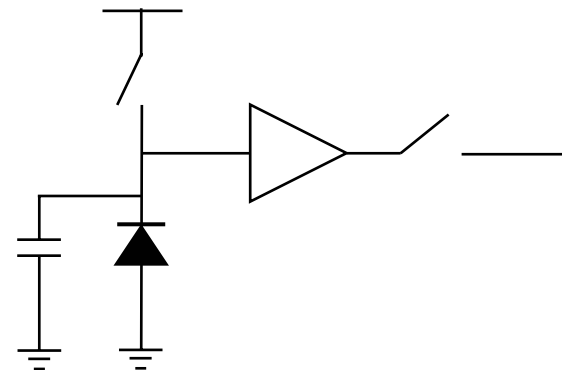
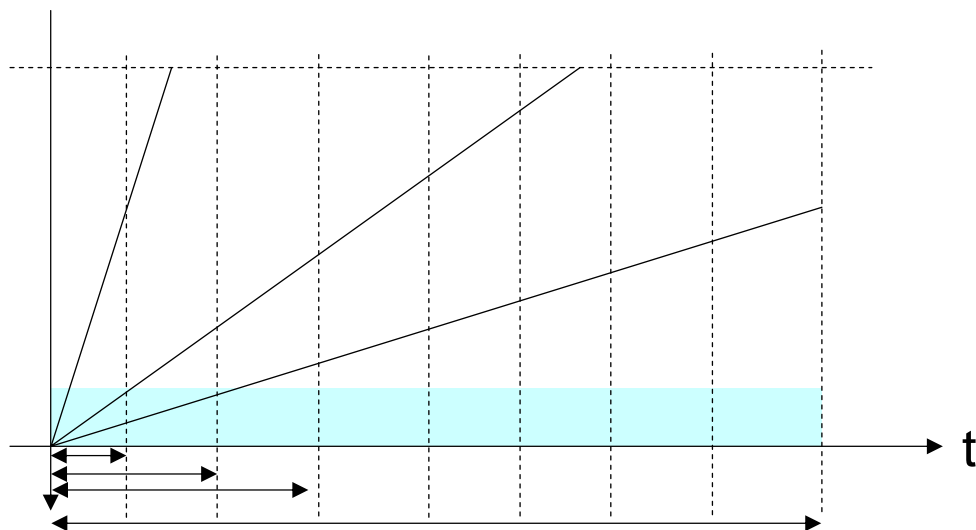
鏡 慎吾 (東北大学): 知能制御システム学 2005.06.14



リセット



非破壊読み出し・複数回サンプリング



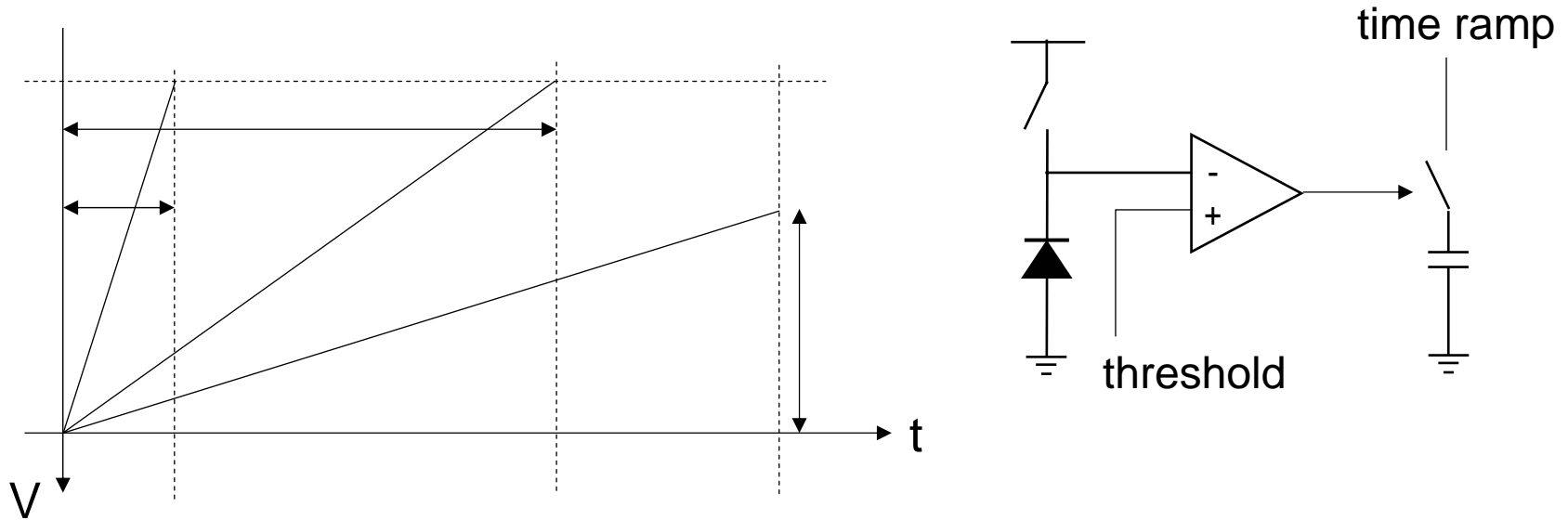
e.g. [佐々木2002] [Kleinfelder2001]

CMOSイメージセンサの場合，
蓄積途中で読み出しても，信号は破壊されない(非破壊読み出し)

読み出しが十分高速であれば(e.g. 並列読み出し)，
ある一度のリセットに対して複数回の信号読み出しを実行できる

- さらに，場合によってリセットを画素独立にかける方法もある
- 相関二重サンプリングは，デジタル的に行う場合が多い

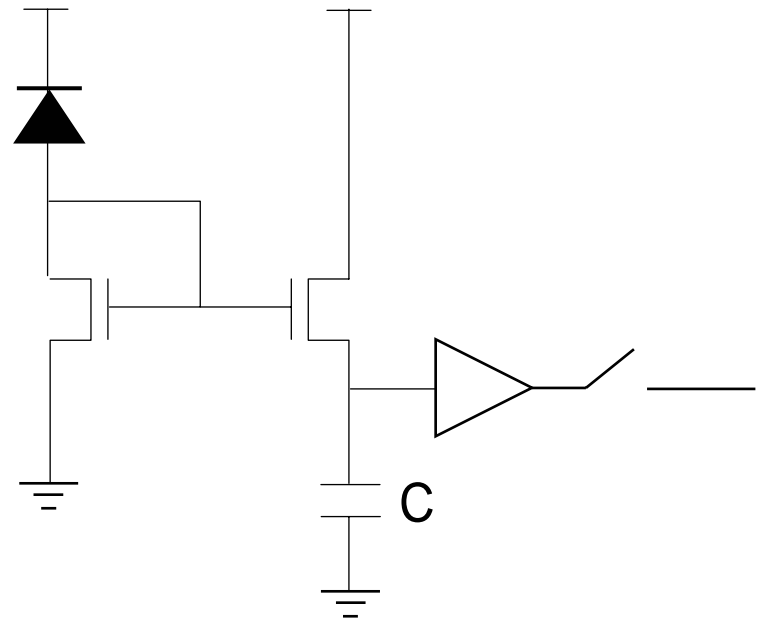
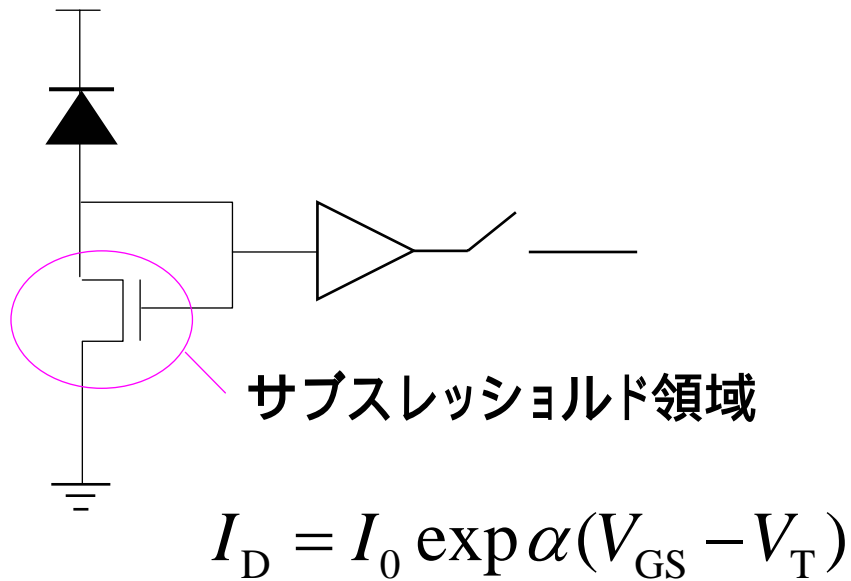
飽和時間検出型



- time ramp には, 時間とともに直線的に増加するアナログ値を入力
- 蓄積信号がしきい値を超えた瞬間の time ramp を保存
- 一定時間以内にしきい値に達しない場合は, 蓄積信号をそのまま読み出す

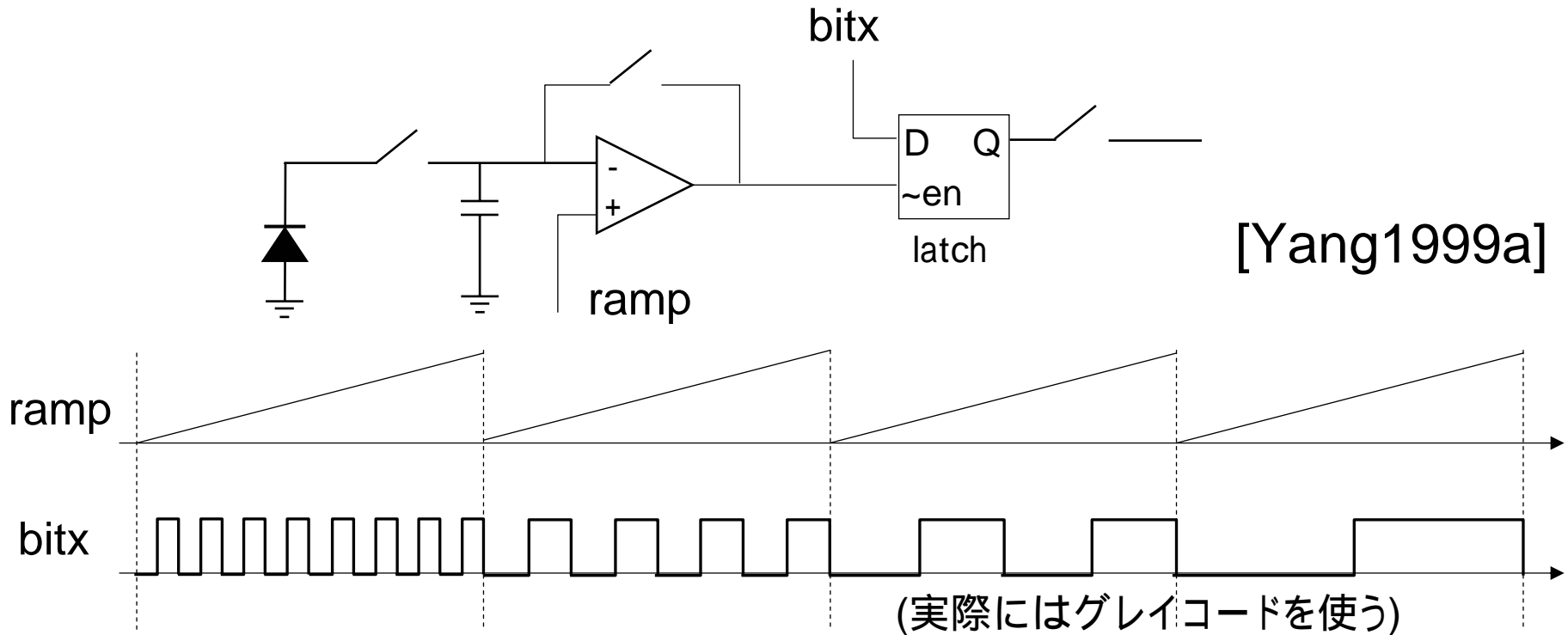
e.g. [Miyagawa1995] [Lule1999]

対数圧縮回路



蓄積型の例 [萩原2000]

デジタルピクセル

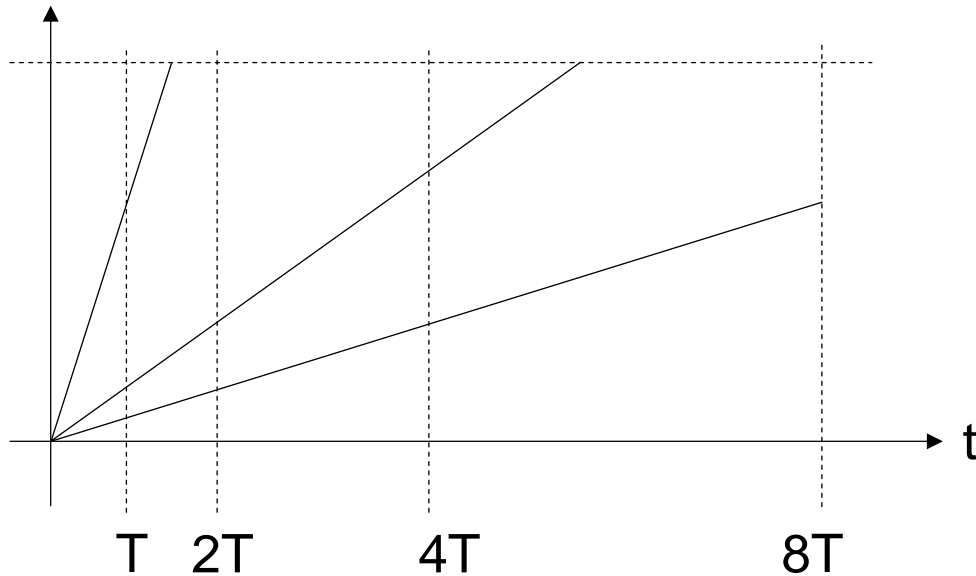


画素内でA-D変換してしまう

- 高速読み出しが可能
- 画素レベル信号処理が可能

ramp を V_{dd} にしてオペアンプのフィードバックを閉じるとリセット
auto-zeroing

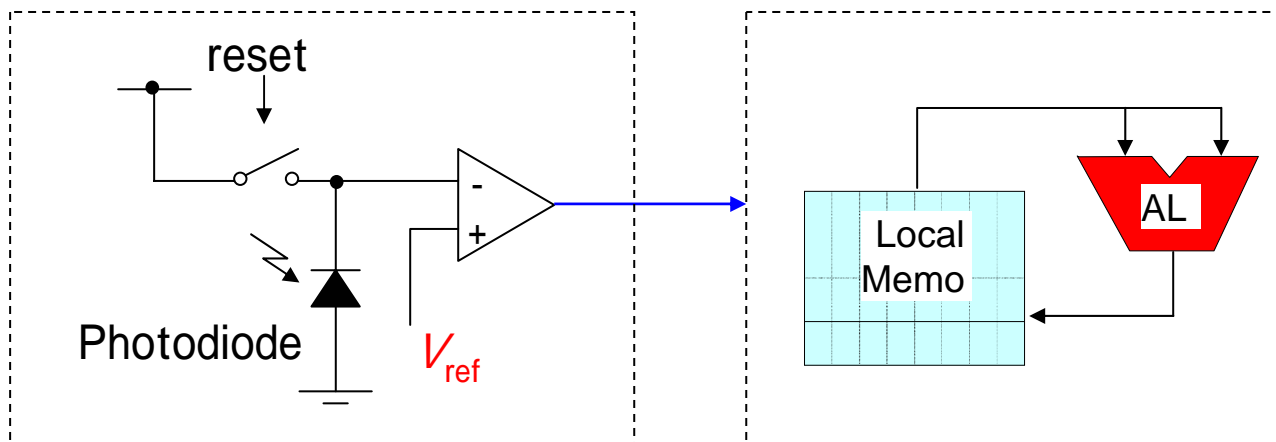
浮動小数点型画素レベルA-D変換



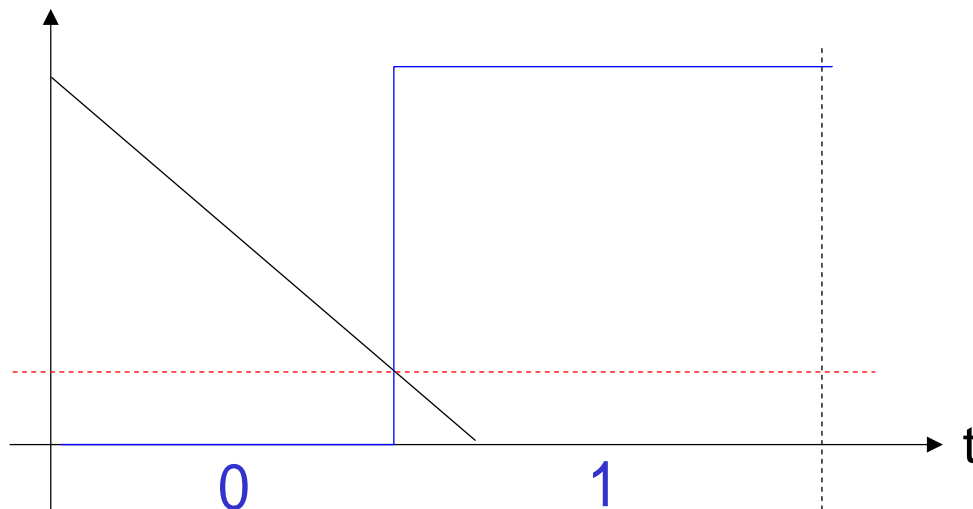
[Yang1999b]

- 前頁の回路 . $t = T, 2T, 4T, \dots, 2^n T$ で非破壊読み出しし, 画素内A-D変換
- 実は $t = 2T$ 以降では, LSB だけA-D変換すればよい(前の時刻の信号の2倍だと分かっている)
- 飽和する直前での変換結果とそのときの t から浮動小数点形式で明るさを得る . 変換結果が m で $t = 2^k$ とすると明るさは $m 2^{n-k}$.

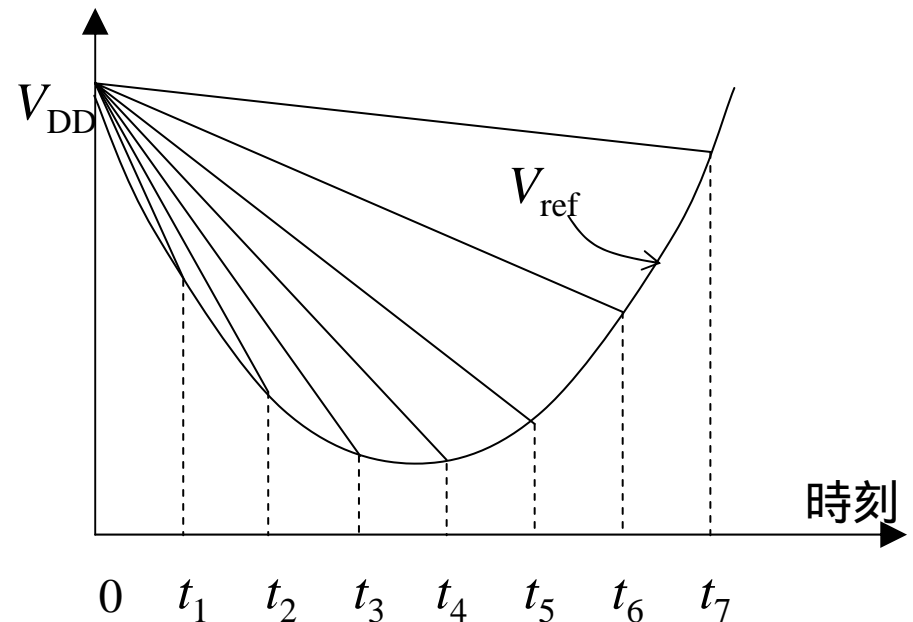
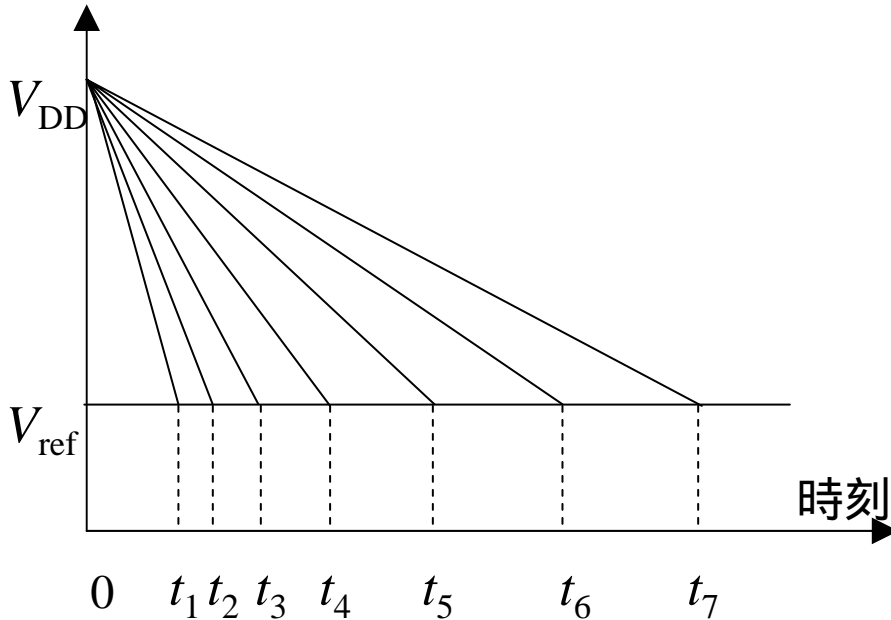
デジタルビジョンチップ



単にメモリがあるだけではなくデジタル処理機能を持つ
画素内A-D変換がソフトウェアで実行可能

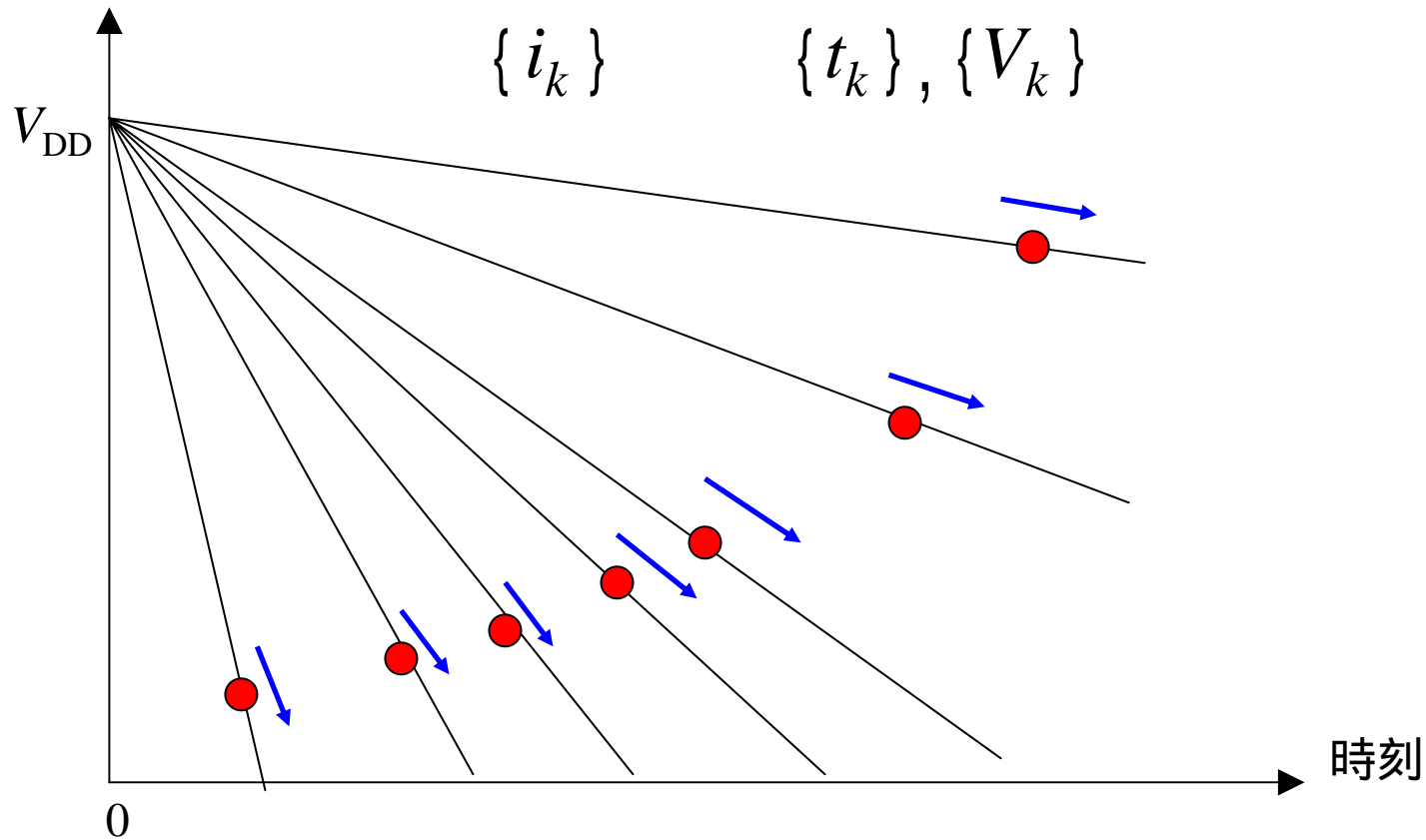


可変しきい値 – 時間カウント型



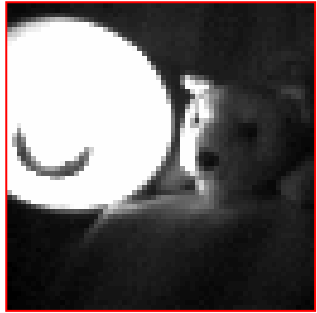
- 適当な時間間隔でPD出力を読み出し, デジタルメモリに加算
- 必要に応じてしきい値を動かしたり, 時間間隔を調整したりする
- 時間間隔が与えられれば, V_{ref} は求まる. V_{ref} が与えられれば, $\{t_k\}$ は求まる
[Astrom1998]
- では, これらを同時に最適化するには?

最適スケジュールによるソフトウェアA-D変換

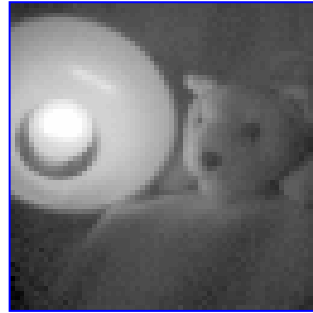


与えられた制約条件の中で, すべての t_k を最大化 [鏡2003]

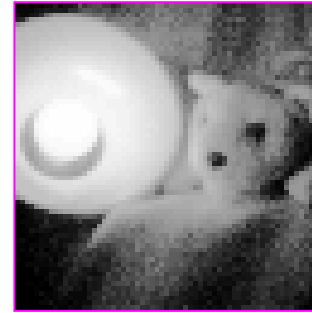
ソフトウェアA-D変換 – 実験結果



$$i_k = 0.03 I_0 (64 - k)$$



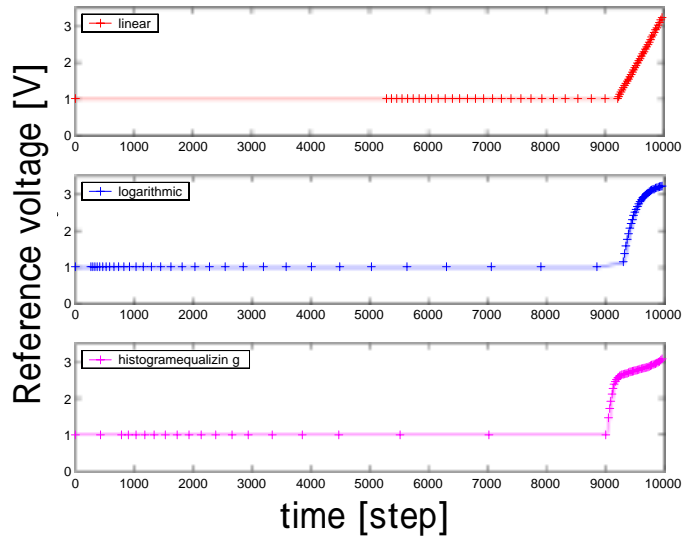
$$i_k = 0.03 I_0 \times 1.12^{(64 - k)}$$



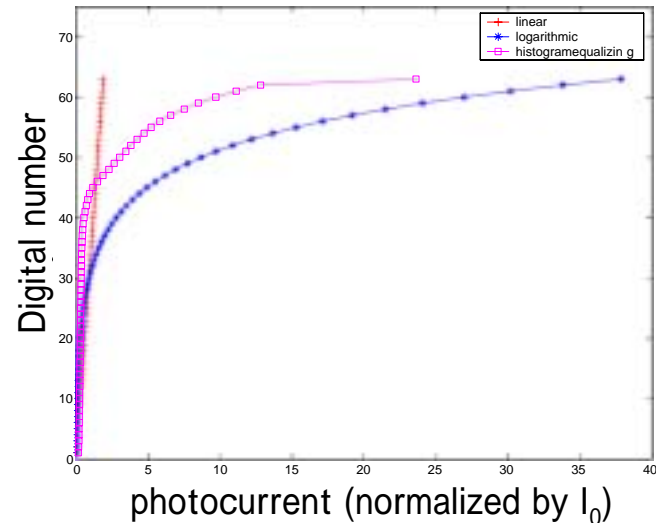
Histogram-equalizing scale

$t_{\max} = 8[\text{ms}]$

Schedules



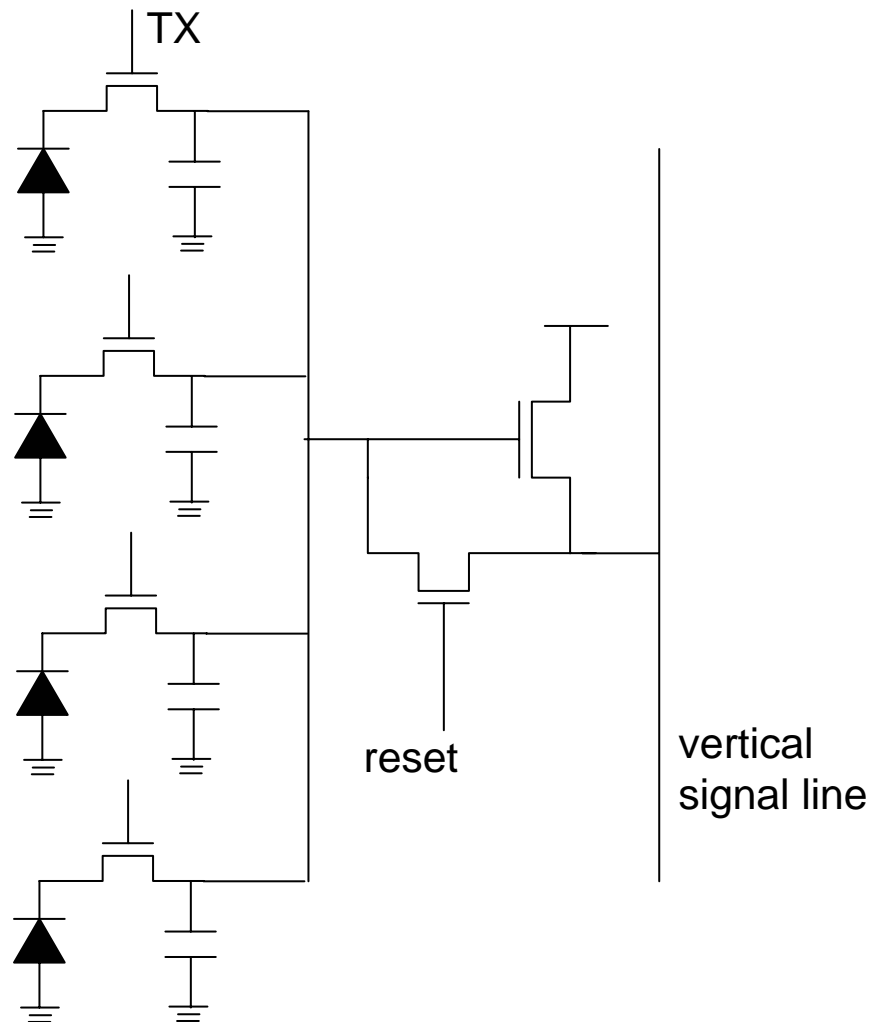
Characteristics



空間解像度

- 基本的には集積化技術の進歩とともに画素が小さくなり、同じ面積により多くの画素を実装できるようになる
- 一方で、高機能を実現しようとする画素の中に含まれるトランジスタ数は増える傾向にある
- トランジスタ数を何とかして削減しようという努力が盛ん

1.5トランジスタ画素回路の例



隣接4画素で読み出し・
リセット回路を共有

$$6 \text{ Tr.} / 4 \text{ pixel} \\ = 1.5 \text{ Tr.} / \text{pixel}$$

[Takahashi2004]

References

- [米本2003] 米本: 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.
- [Yadid-Pecht1997] O. Yadid-Pecht and E. Fossum: Wide Intrascene Dynamic Range CMOS APS using Dual Sampling, IEEE Trans. Electron Devices, vol.44, no.10, pp.1721-1723, 1997.
- [Decker1998] S. Decker, R. D. McGrath, K. Brehmer and C. G. Sodini: A 256x256 CMOS Imaging Array with Wide Dynamic Range Pixels and Column-Parallel Digital Output, IEEE J. Solid-State Circuits, vol.33, no.12, pp. 2081-2091, 1998.
- [佐々木2002] 佐々木, 川人, 田所: 高速読み出しデジタル積分型CMOSイメージセンサによる高照度・低照度両側へのダイナミックレンジ拡大手法, 映像情報メディア学会技術報告, IPU2002-27, 2002.
- [Kleinfelder2001] S. Kleinfelder, S. Lim, X. Liu and A. El Gamal: A 10000 Frames/s CMOS Digital Pixel Sensor, IEEE J. Solid-State Circuits, vol.36, no.12, pp.2049-2059, 2001.
- [Miyagawa1995] R. Miyagawa and T. Kanade: Integration-Time Based Computational Image Sensors, テレビジョン学会技術報告, IPU95-59, 1995.
- [Lule1999] T. Lule, B. Schneider and M. Bohm: Design and Fabrication of a High-Dynamic-Range Image Sensor in TFA Technology, IEEE J. Solid-State Circuits, vol.34, no.5, pp.704-711, 1999.
- [萩原2000] 萩原, 角本, 中村, 草鹿, 鐘堂, 高田: 対数変換形CMOSエリア固定撮像素子, 映像情報メディア学会誌, vol.54, no.2, pp.224-228, 2000.
- [Yang1999a] D. X. D. Yang, B. Fowler and A. El Gamal: A Nyquist-Rate Pixel-Level ADC for CMOS Image Sensors, IEEE J. Solid-State Circuits, vol.34, no.3, pp.348-356, 1999.
- [Yang1999b] D. X. D. Yang, A. El Gamal, B. Fowler and H. Tian: A 640 x 512 CMOS Image Sensor with Ultrawide Dynamic Range Floating-Point Pixel-Level ADC, IEEE J. Solid-State Circuits, vol.34, no.12, pp.1821-1834, 1999.
- [Astrom1998] A. Astrom, R. Forchheimer and P.-E. Danielsson: Intensity Mappings Within the Context of Near-Sensor Image Processing, IEEE Trans. Image Processing, vol.7, no.12, pp.1736-1741, 1998.
- [鏡2003] 鏡, 小室, 藤村, 石川 : デジタルビジョンチップのためのソフトウェア A-D 変換手法, 映像情報メディア学会誌, vol.57, no.3, pp.385-390, 2003.
- [Takahashi2004] H. Takahashi, M. Kinoshita, K. Morita, T. Shirai, T. Sato, T. Kimura, H. Yuzurihara, S. Inoue: A 3.9um Pixel Pitch VGA Format 10b CMOS Image Sensor with 1.5-Transistor/Pixel, 2004 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf., p.108, 2004.