日本放射線技術学会中四国部会 2014 夏季学術大会 画像情報研究会

ノイズの発生メカニズムと低減および利用に関する画像技術

香川高等専門学校 電気情報工学科 本田道隆

今日お話する内容

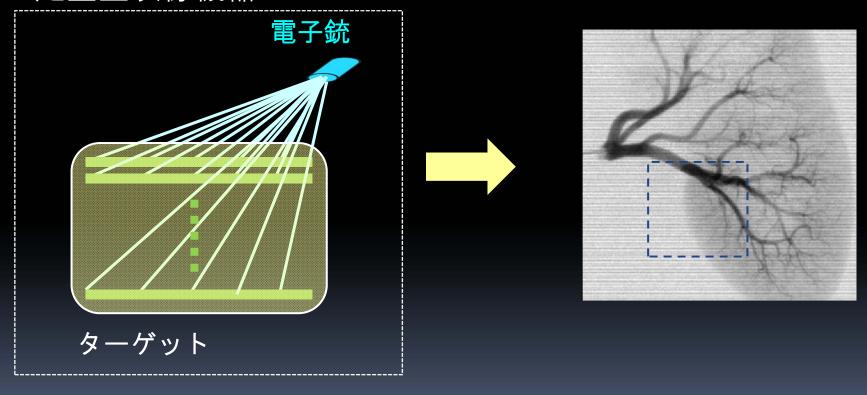
- 1. 画像に重畳する構造的ノイズとその発生原因、 および一般的な対策
 - ・ あまり本質的なものではないが、故障や調整不良のシステムで 画像に障害陰影を与えるノイズと対策
- 2. ランダム性を有するノイズの発生原因と理論的なアプローチ(分析法)
 - 放射線像に本質的に重畳するノイズ、特に量子モトルと熱雑音
 - ・・ノイズ理論の復習と推奨する計測法や分析法
- 3. ノイズ低減手法と利用法について
 - ・システム側の低減手法の紹介、および画像処理による低減法
 - · ノイズは低減すべきものだが、利用することもある

1. 画像に重畳する構造的ノイズとその発生原因、および一般的な対策

ラスターノイズ

(古い映像装置での) 走査線が画像に写り込む

走查型映像機器



(古い

走查型映像

すり込む

近年はビームスキャン方式が姿を消しており、このタイプ のノイズはほとんどなくなった。

しかし、万一古い装置などで低減させる必要があるときは、 ノッチ型フィルタ(後述)がある程度効果的。

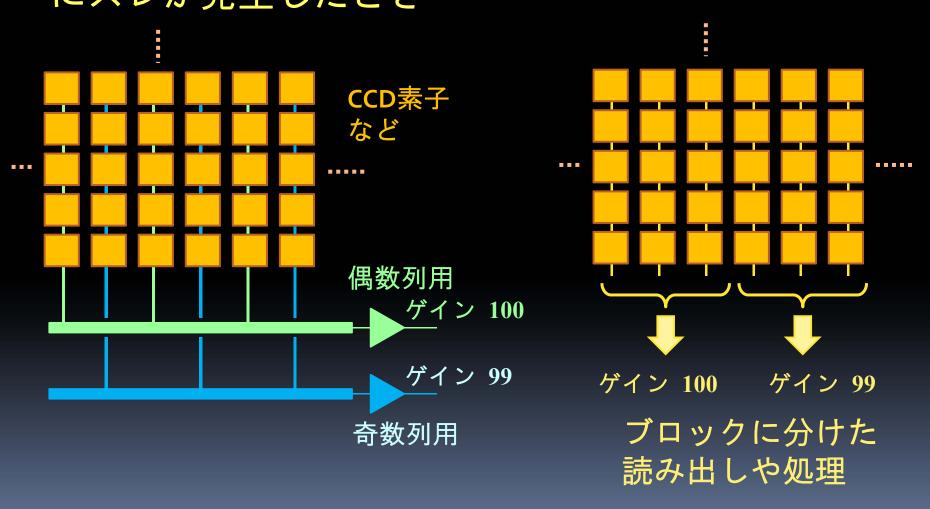
いわゆる不均一性ノイズ(近年の映像系に多い)



このノイズは、現にFPDで発生する。 そこで、均一な被写体を撮影し、このノイズを収集して実際の画像にはその逆のパターンを補正として使用する。 ノッチ型フィルタが有効な場合もある。

いわゆる不均一性ノイズ(近年の映像系に多い)

多重の読み出し機構などで各ラインのゲイン補正 にズレが発生したとき



いわゆる不均一性ノイズ(近年の映像系に多い)

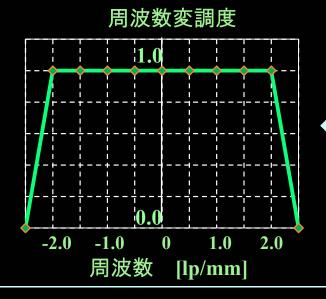


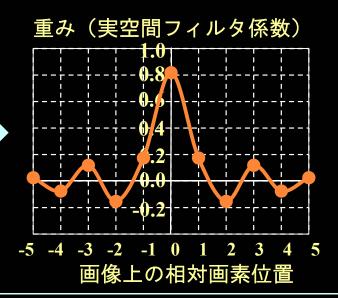
このノイズは、現にFPDで発生する。 そこで、均一な被写体を撮影し、このノイズを収集して実際の画像にはその逆のパターンを補正として使用する。 ノッチ型フィルタが有効な場合もある。

ノッチ型フィルタとは?

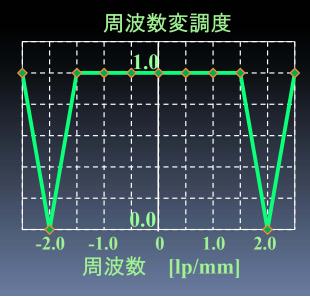
ある特定の周波数成分だけを画像上から除くように設定したフィルタ

最大周波数 成分を除去

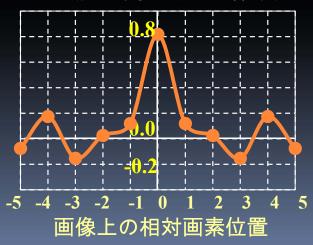




2 lp/mm の 周期成分を 除去



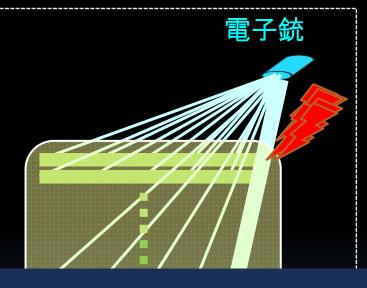
重み(実空間フィルタ係数)



外来(飛び込み)ノイズ

走査中に外来ノイズが画像に混入する

走查型映像機器

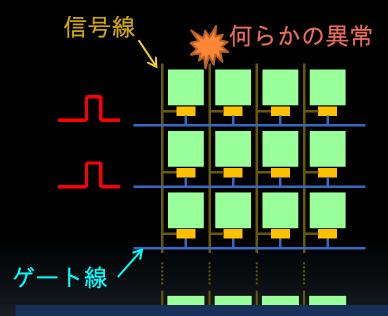




このノイズは、微小な信号検出の際に、モータなどの電磁波が検出回路に影響を与える場合などに生じる。(現在はEMI対策などがルールになっており十分対策が進んでいる)代表的対策としてメディアンフィルタがある。

故障によるノイズと緊急措置

平面検出器の場合、信号線やゲート線が縦横に走行している(故障時には線状影が発生しやすい)





よほどの事故(検出器が壊れるほどの強い衝撃を受けるなど)がなければ現在の製造技術では考えにくいが、万一発生した場合には目立たせないような緊急措置は可能。 これも、メディアンフィルタが最も単純で簡単な対応。

メディアンフィルタとは?

メディアンフィルタ = カーネル内の中央値を出力するフィルタ

カーネルサイズ: 3×3のとき

上から順に9個の画素値を並べると {38,31,25,24,16,15,10,9,7} となる。中央値は5番目に大きい値 なので16がフィルタ出力 (これまでの24を16に置き換える。)

中央値なのでノイズが平滑化される。エッジをぼかさない。

細線を消せる。(消えてしまう)

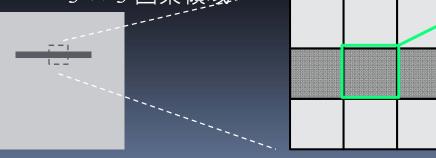
29	18	2	51	37
29	38	16	31	9
30	7	24	15	32
19	25	9	10	33
48	4	30	29	17

が出力される

16

カーネル内に細い線があっても メディアンフィルタで除かれる (パーフェクトではないが)



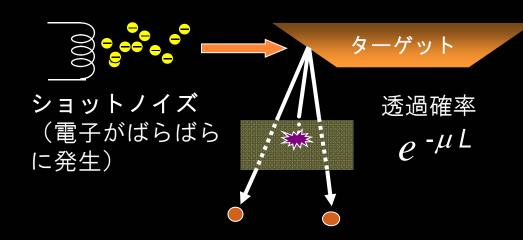


2. ランダム性を有するノイズの発生原因と理論的なアプローチ(分析法)

- ・ノイズの発生原因と少しばかりの理論的復習
- ・回路系ノイズの基礎的な説明
- ・計測法に関する補足

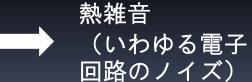
ランダムノイズの2大発生原因 ショット雑音と熱雑音

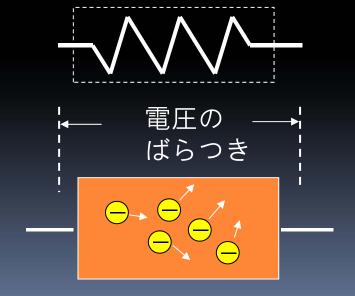
ショット24ズ) (ショットノイズ)



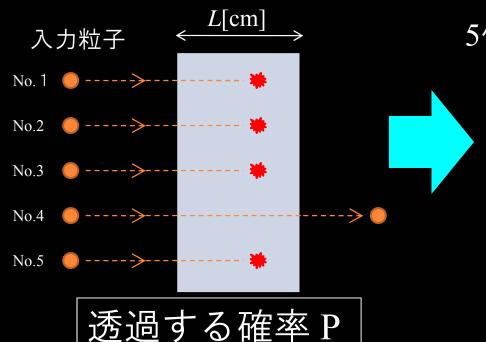
熱雑音 (ジョンソンノイズ) <u>(サー</u>マルノイズ)

電荷移動を阻止する作用 がある抵抗器内における 電子の不規則運動





ショットノイズ=ポアソンノイズ (1)



5個のうち1個透過する確率は?

1個が透過する確率 : P¹ 4個が透過しない確率 : (1-P)⁴

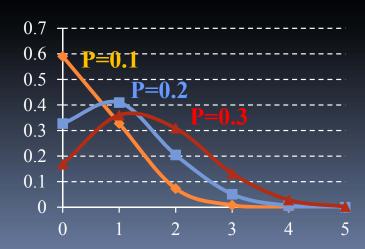
だから $_5C_1 \times P^1 \times (1-P)^4$



この要領で、0個から5個まで計算すると

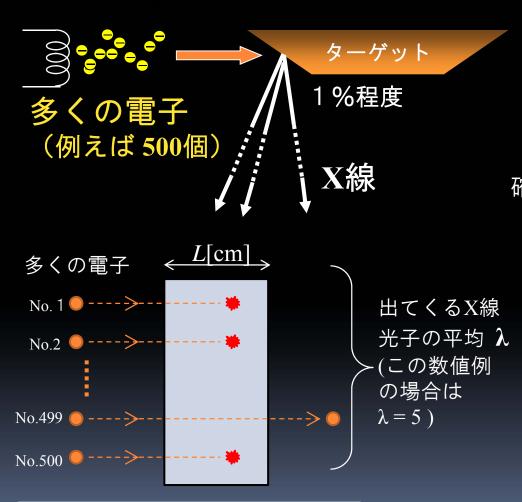


こういうのを「二項過程」や 「ベルヌーイ試行」などと 言います



ショットノイズ=ポアソンノイズ (2)

X線の場合は、多量の電子がターゲットに当たり、しかも電子 \rightarrow X線となる確率も小さい (約1%)

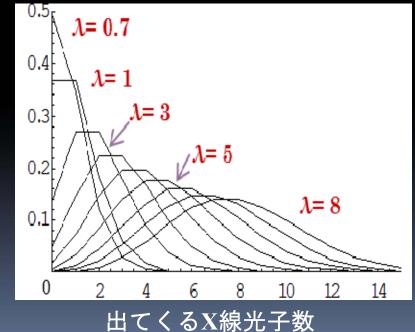


0.01

X線になる確率

このような場合、出てくる X線はポアソン分布に従う

確率(ヒストグラム)



多くの入力 (n 個) が 確率p で 出力されるときの ポアソン分布

発生した事象数がk個である確率 $P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$ 期待値 $\lambda = np$ 分散 $\sigma^2 = np$

期待値と分散が等しいことは大事な事実

λが大きくなれば正規分布に近づいてくることも重要な事実

たとえば透視の場合

1画素にX線光子(フォトン数)が 平均9個吸収されると、分散も9。 だから、標準偏差は3なのでノイズ の大きさは3となる。

ただし、間接変換では少しボケる のでノイズはその分少なくなる。



画像の平均値からノイズが 分かるので条件制御などで、 インテリジェンスな制御も できる。

ショットノイズ の伝搬



被写体上の1×1mm面積 に入るX線光子 平均 40,000個とすると 標準偏差は 200個

 $\overline{SNR} = 200$

被写体(透過率 0.01)



400個 平均 標準偏差は20個

SNR = 20

検出膜(吸収率 25%)



100個 平均 標準偏差は10個

SNR = 10

間接変換ではボケ



100個 平均 標準偏差は5個

見かけ上のSNR = 20

読み出し回路のノイズ

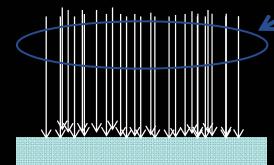


平均 100個 標準偏差は6個

見かけ上のSNR = 16.7

ショットノイズ の伝搬

ポアソン分布に従う統計的性質



被写体上の1×1mm面積 に入るX線光子 平均 40,000個とすると 200個

SNR = 200

被写体(透過率 0.01)

400個 平均 標準偏差は20個

標準偏差は

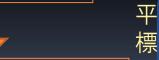
ここは二項過程による統計的 作用が発生するが、ポアソン 分布に従う性質は保たれる

SNR = 20

検出膜(吸収率 25%)

100個 平均 標準偏差は10個 細かい被写体ではボケの影響を受 けるので、周波数毎に DQE(f) で 評価されることが多い

間接変換ではボケ



平均 この3者をまとめて検出器の性能 標準を量子検出効率 (DQE) で表し、 X線の利用率を数値化する

SNR = 20

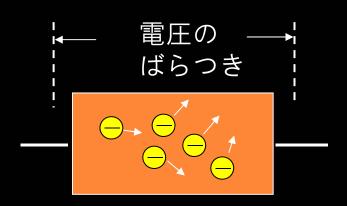
読み出し回路のノイズ



見かけ上のSNR = 16.7

熱雑音=電子ノイズ=回路ノイズ(1)

抵抗器から発生する!



電圧のばらつき(ノイズ)

$$V = \sqrt{4kTR \Delta f}$$

k: ボルツマン定数

T: 絶対温度

R:抵抗值

f: 周波数帯域

絶対温度が高く、抵抗値が大きいと熱雑音は多く発生する。



昔、冷却したカメラを使った 映像装置なども試作されたこ とがありました。

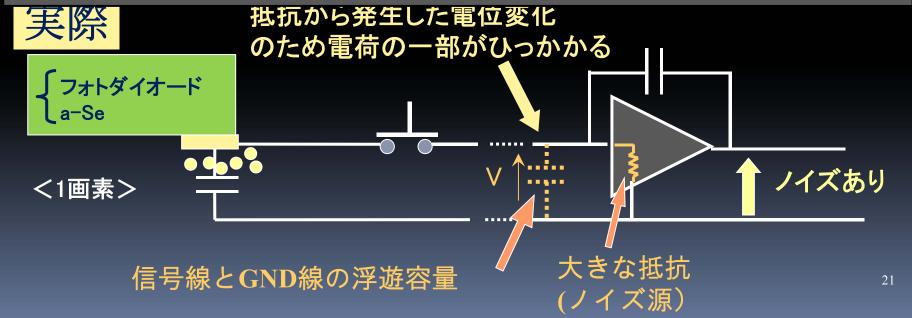
熱雑音=電子ノイズ=回路ノイズ (2)

知っておいていただきたい 回路ノイズの発生原因

熱雑音そのものは神の産物ともいえるUncontrollable なもの。 これをいかにして画像に伝搬しないようにするかが技術。

映像系技術に関しては、

- ・浮遊容量を減らすこと
- ·信号の量を極力増やすこと などが著名な知見であり、鉄則ともいえる



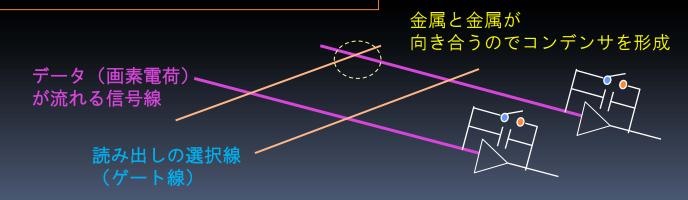
熱雑音 = 電子ノイズ = 回路ノイズ (3)

浮遊容量を減らすと言っても・・ 実寸大の検出器は苦労が多い

実寸サイズの長い配線



どうしても配線がクロスになる



回路で発生するノイズの影響の変化

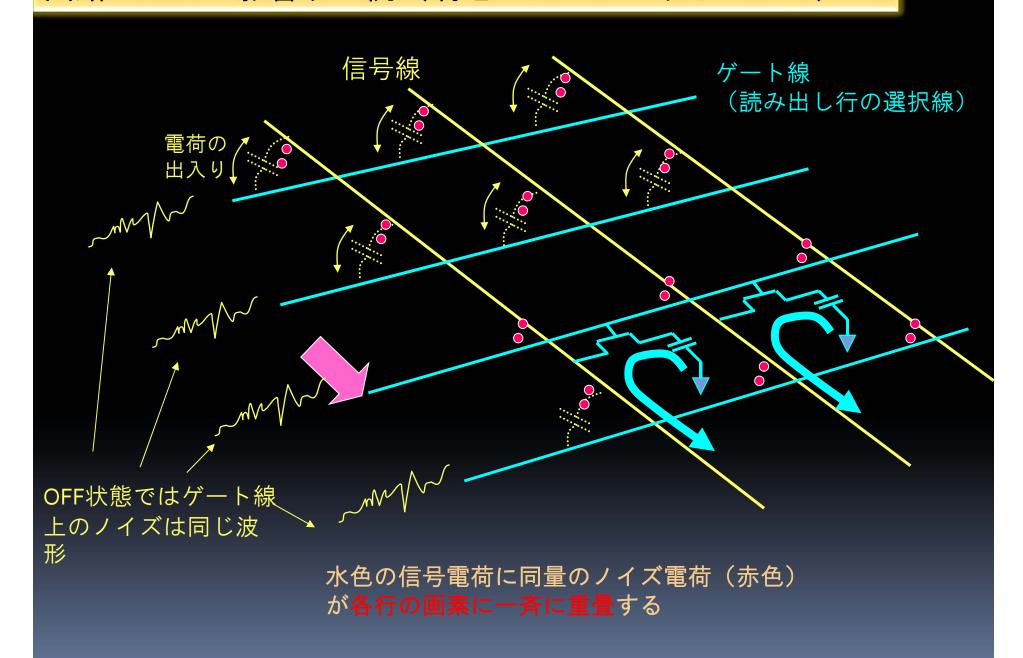


刷毛ではいたようなノイズ

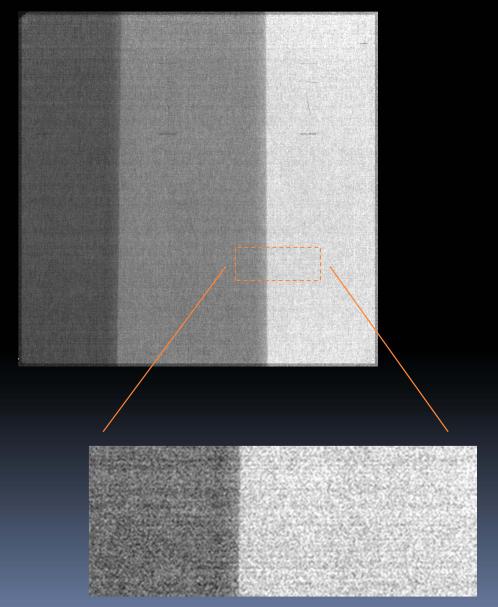
現在、臨床に使えるように なったが極低線量部は少し 残ることがある

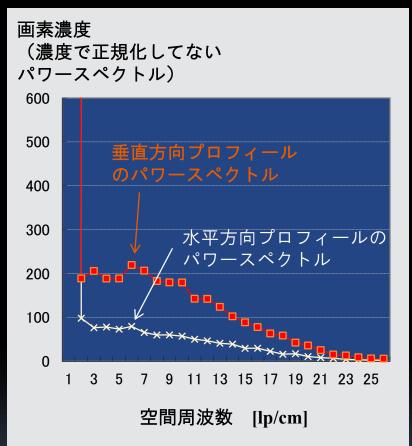
経験的に回路ノイズに「補正」はなく、 本質的に低減しなければうまくいかない

回路ノイズが影響する例(刷毛ではいたようなノイズ)



現在は対策が進んでいるため、この例のような劣化画像を出力することはないが、極低線量の部分などで存在を指摘されることはあり得る。





ランダムノイズの計測について

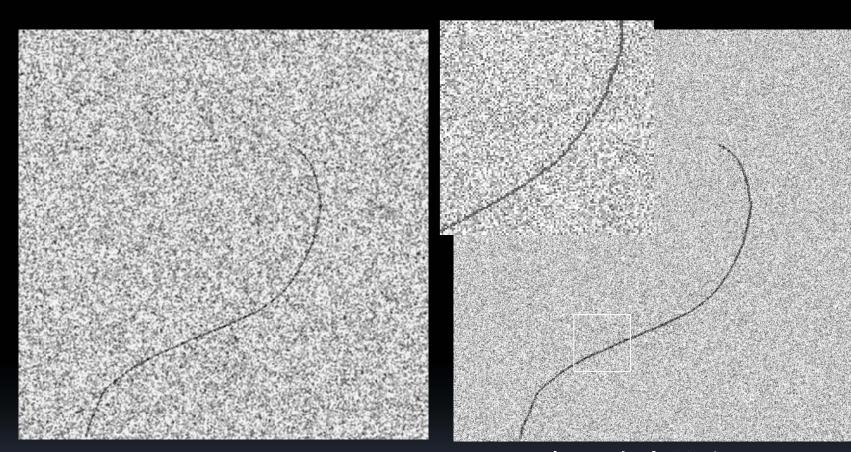
- ・標準偏差
- ・ウィナースペクトル(パワースペクトル)

この両者は品質管理などでは水平方向と垂直方向の それぞれで計測するとより正確な管理ができる。 (画質や処理の研究でも場合によっては必要)

背景トレンド除去の代わりに、画像を2枚収集して減算する手法でもかなり良い結果が得られる。 (ノイズは約1.4倍になっていることに注意)

標準偏差は簡便で大変有益な指標だが、これ以外にノイズの周波数特性も計測することを勧める。

ランダムノイズの周波数特性は画質評価で極めて重要



低周波成分多い

Contrast 0.5

CNR 2.0

高周波成分多い

Contrast 0.5

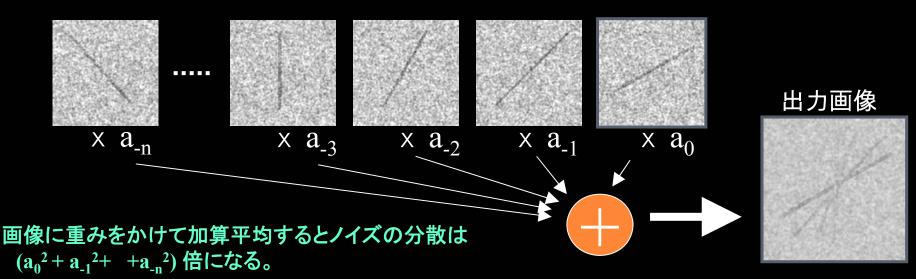
CNR 2.0

3. ノイズ低減手法と利用法について

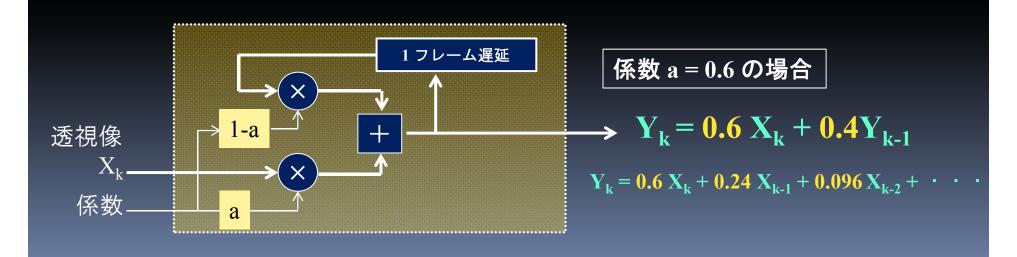
- ・回路ノイズの低減は一般には Uncontrollable?
- ・画像処理によるノイズ低減を中心に
- ノイズを利用する技術について

ランダムノイズ低減の基本手法

1. フレーム間平均効果による低減(リカーシブフィルタ)

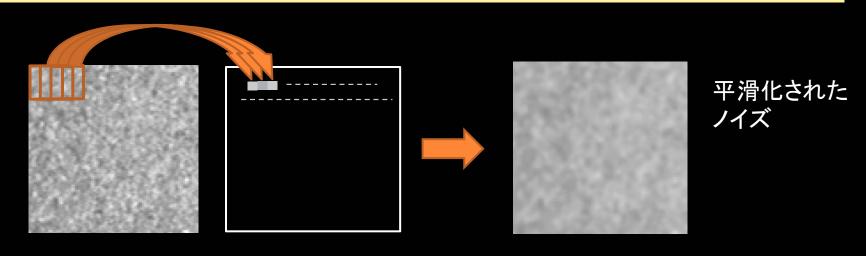


例: 4枚の加算平均で各重みを 0.25 とすると分散は $0.25^2 \times 4$ 倍 = 0.25 倍になる。 ノイズ量 (標準偏差) では 0.5 倍になる。



ランダムノイズ低減の基本手法

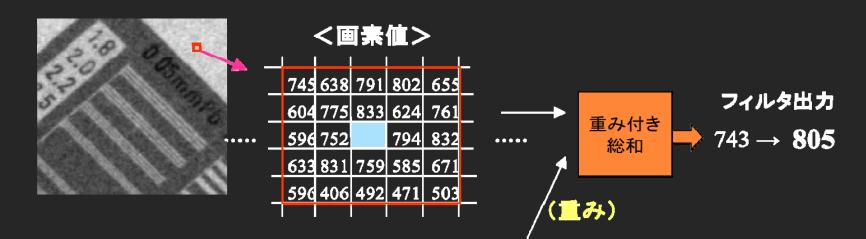
2. 画素同士の平均効果による低減(線形空間フィルタ)



ランダムノイズ低減の基本手法

2. 画素同士の平均効果による低減(線形空間フィルタ)

重み係数が全て正なら平均化効果が強く凸凹はならされる = 高周波成分の低減 重み係数にうまく負の数を入れると、特定の凸凹を強調できる = 高周波成分の強調 (数学的には、周波数特性を逆フーリエ離散変換して重み係数が具体的に求まる)



<2次元フィルタ係数>

画像の明るさ(平均レベル) を変えないために合計して 1 になるようにする

0.25	-0.2	-0.6	-0.2	0.25
-0.2	0.16	0.48	0.16	-0.2
-0.6	0.48		0.48	-0.6
-0.2	0.16	0.48	0.16	-0.2
0.25	-0.2	-0.6	-0.2	0.25

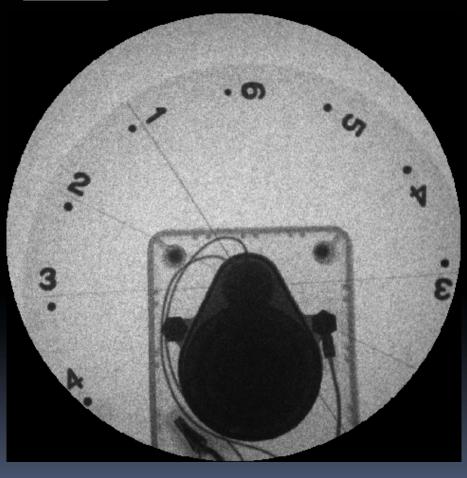
中心画素の周囲の係数が正の 値なら平滑化(いわゆる平均)。 高周波数成分が低減される。

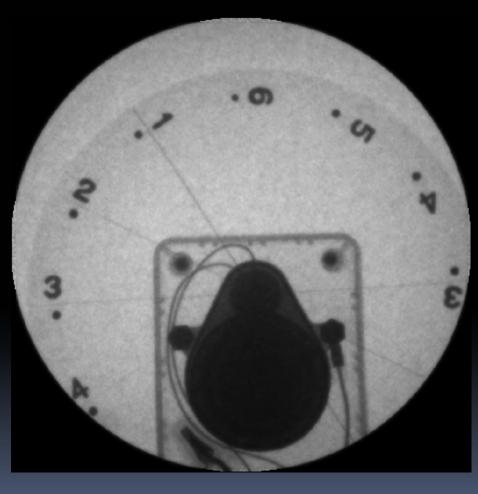
逆に負の値なら、周辺画素との格差が広がるので鮮鋭化されて 高周波成分が強調される。

線形フィルタのサンプル

原画

空間(平滑化)フィルタ

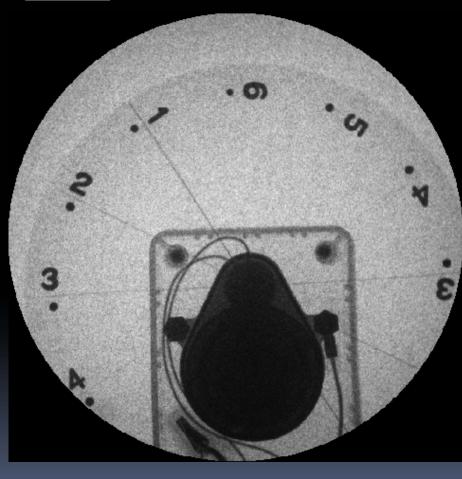


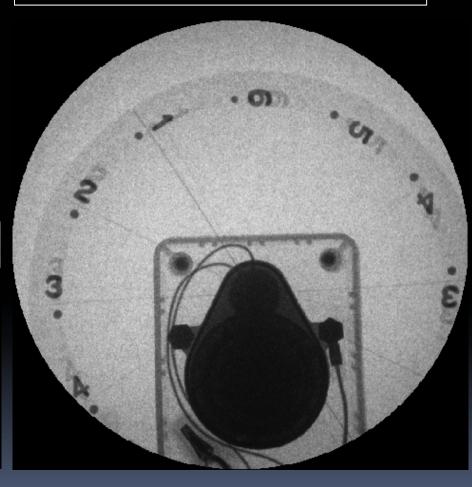


線形フィルタのサンプル

原画

リカーシブフィルタ (係数 0.6)





ランダムノイズ低減の基本手法の不満な点

リカーシブフィルタ (単純フレーム平均)

ランダムノイズは低減 するが、<u>動く信号の</u> コントラストも低下さ せてしまう 線形空間フィルタ (平滑化フィルタ)

ランダムノイズは低減 するが、<u>細かい信号</u>の コントラストも低下 させてしまう





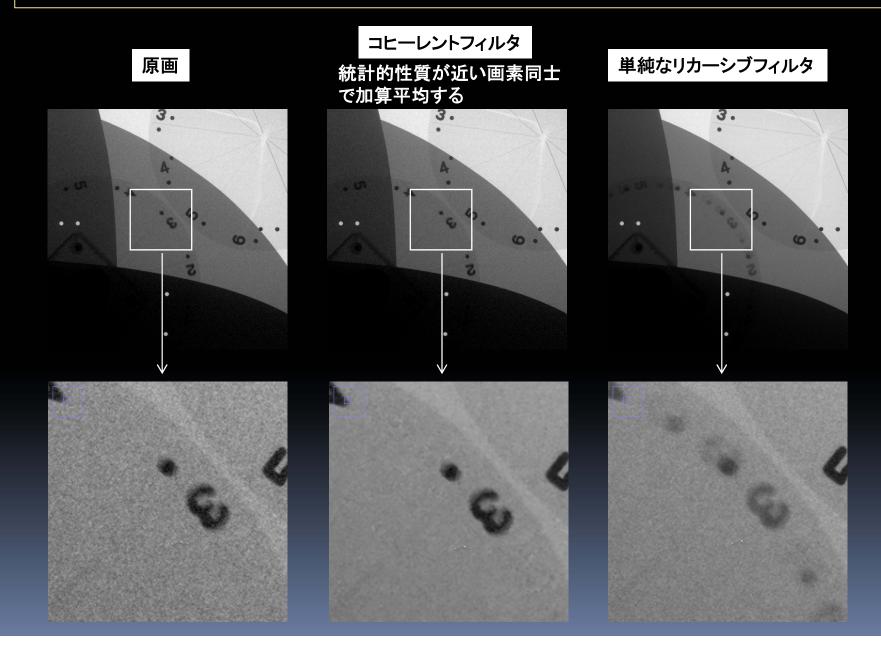
信号とノイズを分けて個別に処理する必要がある

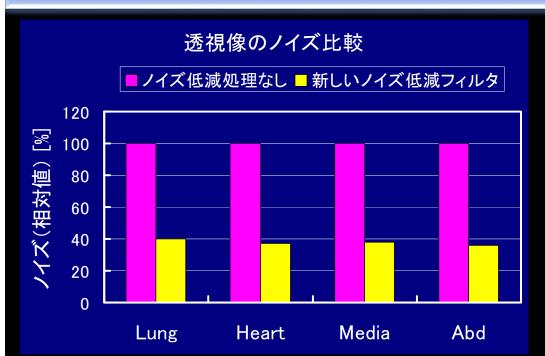
- ・先見情報に基づいてパターン認識などで信号と背景と弁別するタイプ
- ・ノイズと信号の一般的性質の差を検知しながらフィルタを変えるタイプ

これらは、「エッジ保存型ノイズ低減処理」と呼ばれる

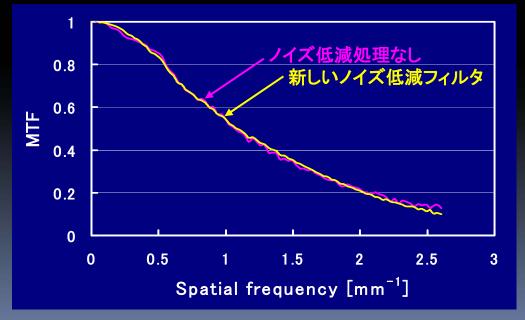
実際に応用されている処理例

観察対象を限定せず、信号と背景を局所の統計的性質で弁別する処理



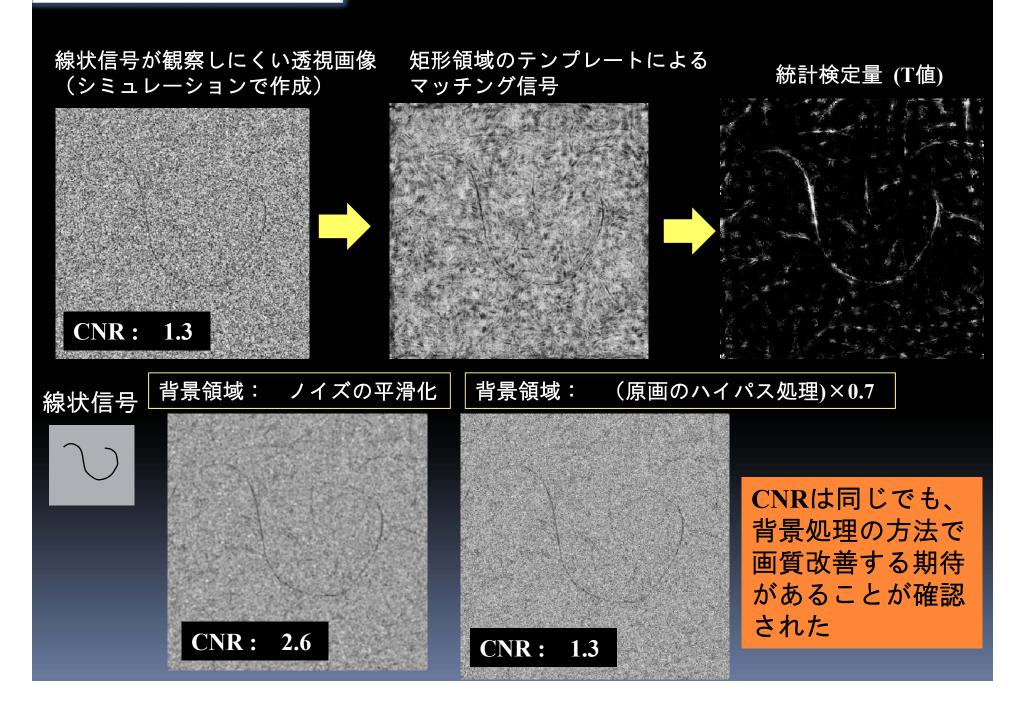


画像の明るさによらずノイズを約40%にすることができた。

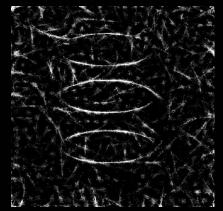


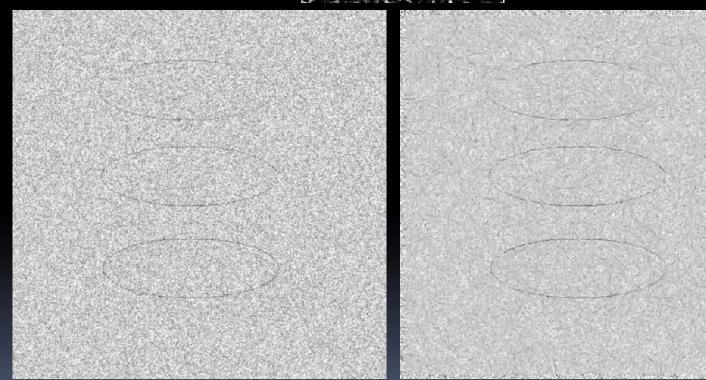
このフィルタを適用してもMTFの 劣化はなかった。

現在研究途上の処理例



現在研究途上の処理例2





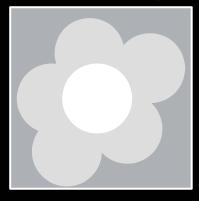
原画

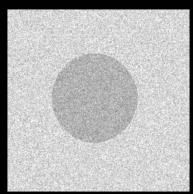
背景ノイズを高周波化してさらに ノイズ量を約70%に抑えた結果

なぜノイズが細かいと線状信号が見やすくなるのか?

~ Statistical Decision Theory Model(SDTM)からの説明 ~

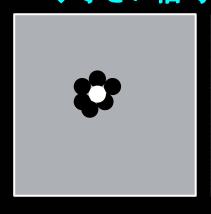
◆大きい信号を見る場合

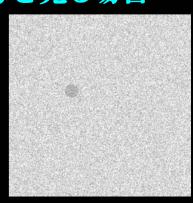




信号の周りのノイズは、広い範囲で 平滑化して見ている。

◆小さい信号を見る場合





信号の周りのノイズは、狭い範囲で平滑化し、細かいノイズとして見ている。

「信号を見るとき知覚の過程で、信号と同じ周波数特性をもつフィルタ をノイズに自然にかけている」 と考えると大変うまく説明できる。

実際、この考え方は放射線画像分析でよく使われる。

Statistical Decision Theory Model (統計的決定理論モデル)

信号

視覚系の周波数特性

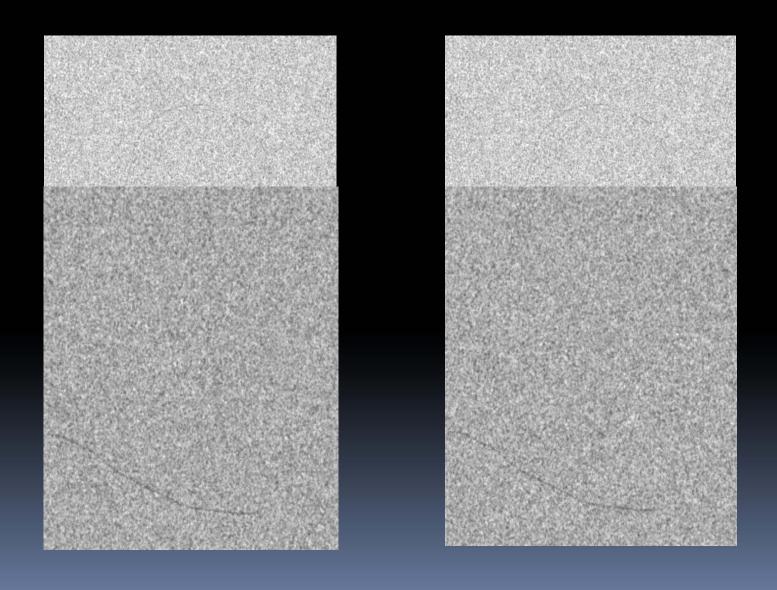
$$SNR_{SD}^{2} = \frac{\left(\int S^{2}(f) \cdot V^{2}(f) df\right)^{2}}{\int \left(N(f) \cdot V^{2}(f)\right) \left(S^{2}(f) \cdot V^{2}(f)\right) df}$$

ノイズのパワースペクトル

ここに信号特性がフィルタのように入る

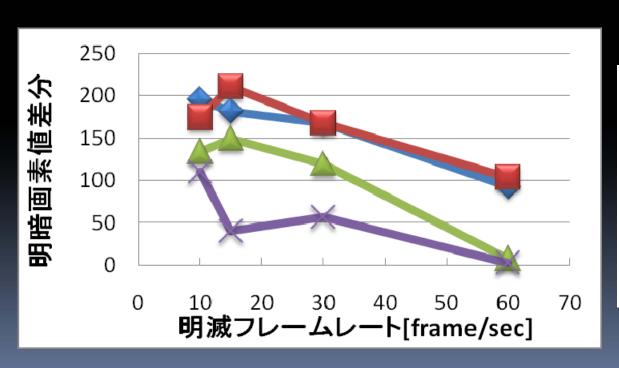
SNRsD が同じ画像例

右と左のどちらの画像が線が見やすいでしょうか?



なぜノイズが速く動くと線状信号が見やすくなるのか?

ヒトの視覚系は速い動きを 正しいレベルで感知できない。 つまり、時間方向に平滑化 フィルタをかけて知覚する。



明滅1辺サイズ ◆64pixel ♣16pixel ◆4pixel ←1pixel

画像上のランダムノイズを低減させるには?

・ノイズ量(ノイズの標準偏差)を低減させる。

物理的な低減。 普通、ノイズ低減とはこのことを指す。

・ノイズの周波数特性を相対的に増強する。

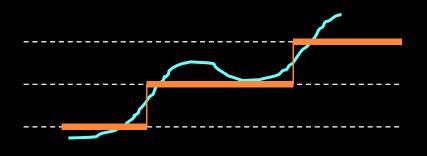
知覚的な低減。 画像技術に通用するノイズ低減の一方式。

・ノイズをダイナミックに高速で動かす。

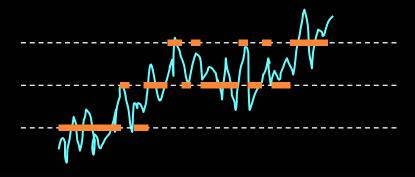
知覚的な低減。 画像技術に通用するノイズ低減の一方式。

ノイズの利用 (一般的なもの)

工学的には、量子化ノイズの低減法や、いわゆる心地よい 1/f ゆらぎを形成したインターフェース技術などが知られている。



同一信号が継続的に発生するような場合、ノイズがなければデジタル化するときに誤差が生じる。



ランダムノイズを重畳させて計測を 何度も行って平均すると、量子化 レベル以下の精度で信号がデジタル 化できる。

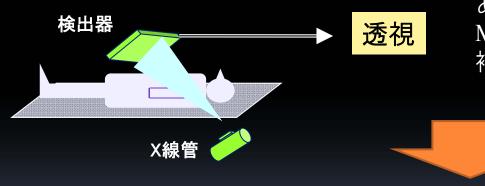
ノイズの利用 (X線技術特有)

X線のフォトン数がポアソン分布に従うことを利用

期待值 $\lambda = np$

分散 $σ^2 = np$

画像レベルを計測すると、ノイズ量が推定できる!



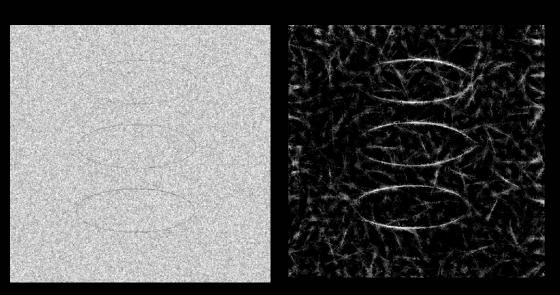
ある場所の SNR = 10 だった。 MTFでノイズが少し減っていることを 補正すると、X線光子数は 50個/画素

> DSA では管電圧を下げて _コントラストをあげ、 _さらに SNR を10 倍にしたい

DSA

70kVで光子数を 5000個 にすればよい ので、テーブルをひいて mAsを決めれば 良い!!

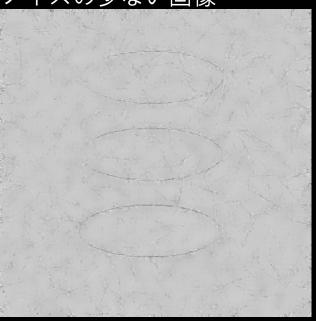
ノイズの利用 (画像処理の例)



パターン認識には誤認もある

アーチファクトを目立たせないようにして、オペレータに違和 感を与えないようにすることは 重要。

ノイズの少ない画像



適度なノイズがある画像

