

醫學影像處理

Image Processing

鍾孝文 教授

台大電機系 三軍總醫院放射線部

數位醫學影像處理

- **Filtering and enhancement**
- **Reconstruction from projections**
- **Three-dimensional displaying**
- **其他相關 topics ...**

那為什麼只教這幾種

- 因為我個人認為這些題目 ...
 - 比較適合各位目前程度
 - 只需要一般數學基礎
 - 與物理生物等比較無關
- 而且退選已經來不及了，哈哈！

影像濾波與強化

Filter, Enhance, ...

鍾孝文 教授

台大電機系 三軍總醫院放射線部

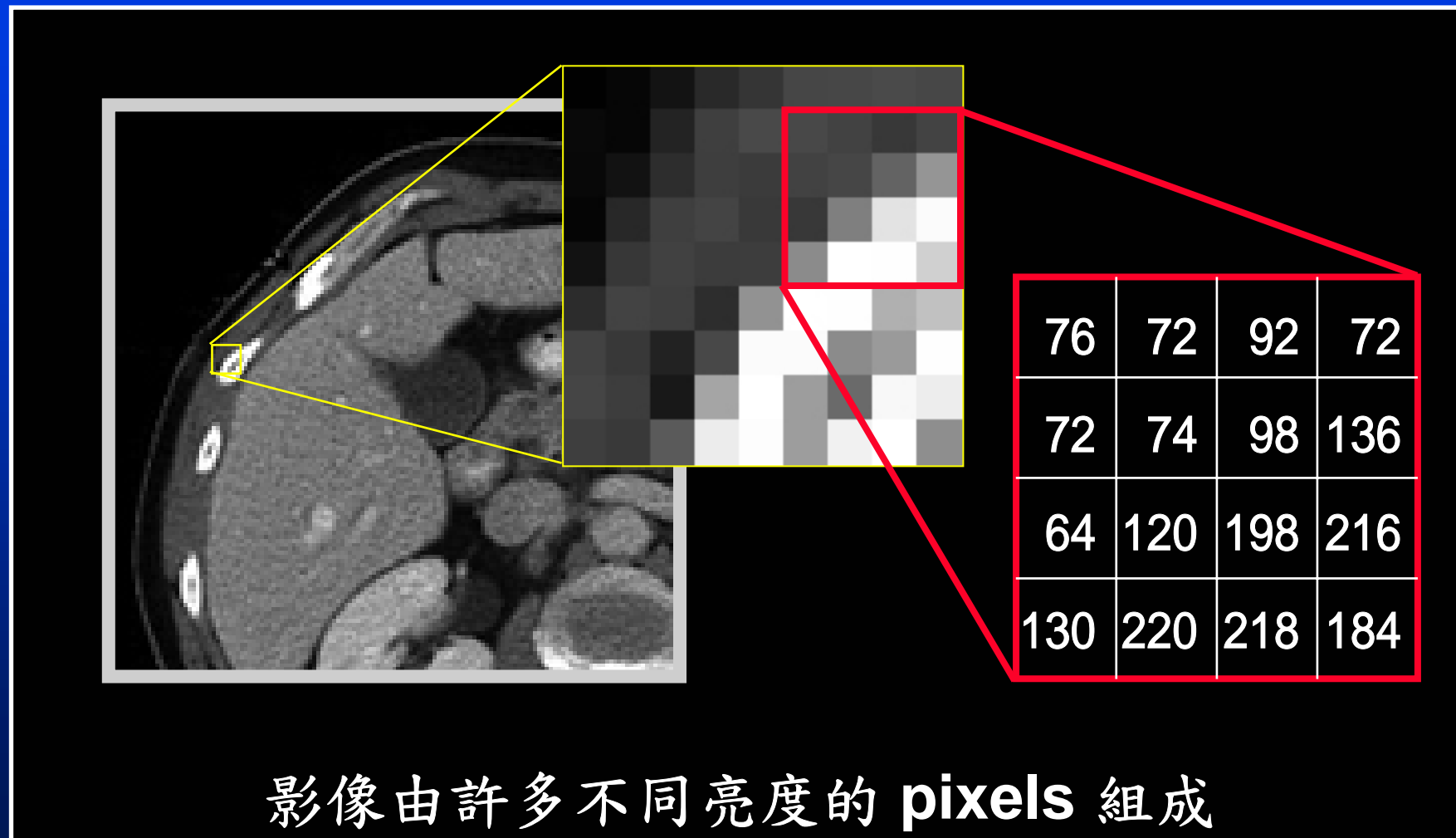
影像濾波與強化

- 適用於任何數位影像 (不限醫學)
- 主要用於減低雜訊或凸顯邊緣等
- 考慮入門興趣與程度 ...
- 本次只會提到最簡單的幾項

先建立觀念

- 數位影像由許多點組成
- 稱為 picture element (pixel)
- 每個 **pixel** 的數值代表亮度 (灰階)
 - 暫時不考慮色彩

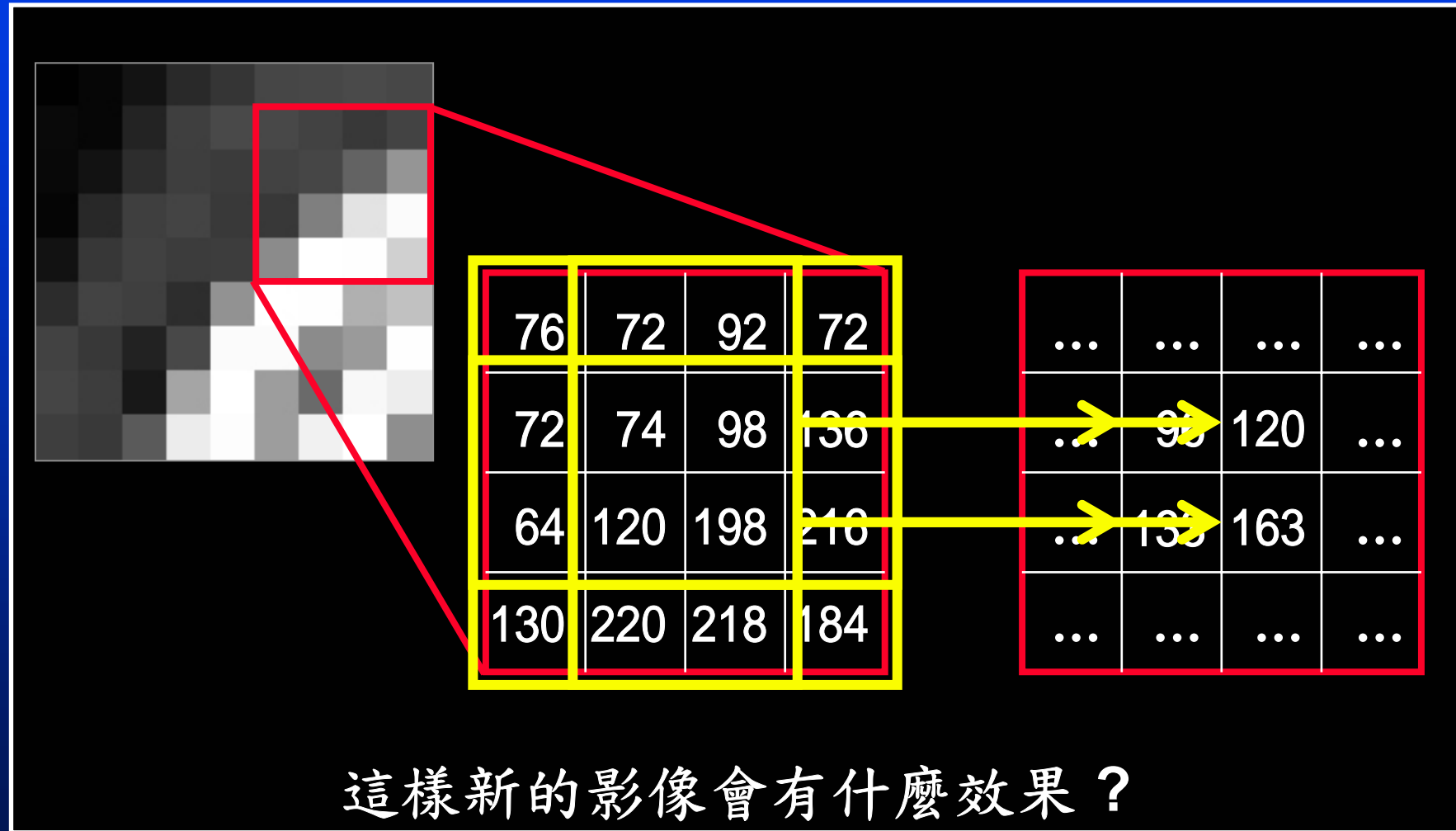
典型數位醫學影像



先用個簡單例子說明

- 計算影像的每一 **pixel** 以及其周圍上下左右共 8 個鄰居的平均值
- 之後存入新影像同位置的 **pixel** 中
— 畫個圖說明一下吧 ...

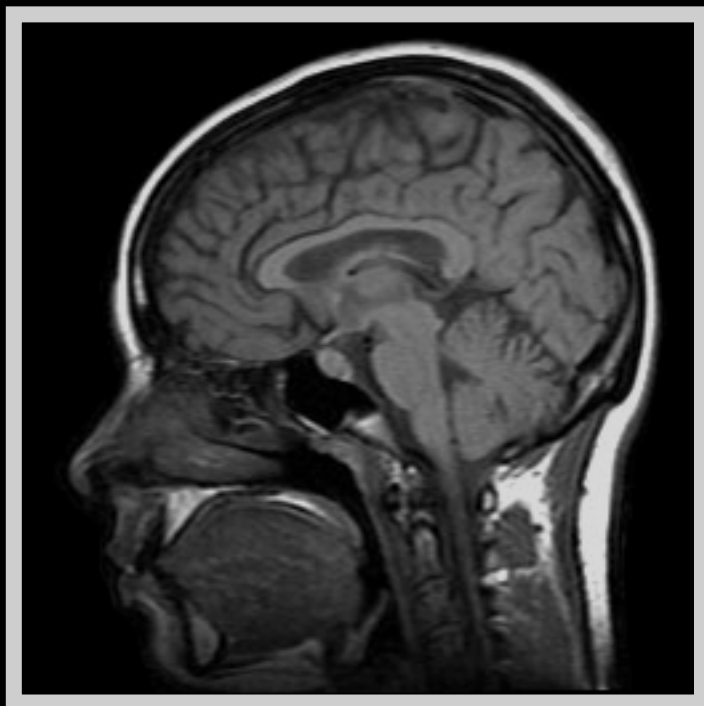
先從一個簡單例子說明



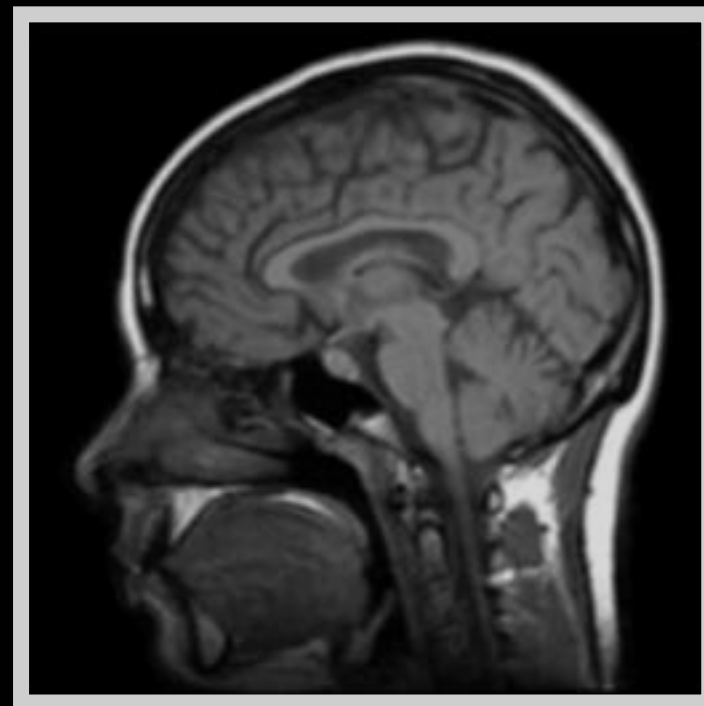
3x3 平均的效果

- 鄰近 **pixel** 數值相近者影響較小
- 亮度變化差距大者趨於一致
- 相鄰器官組織之邊界將模糊化
- **Low-pass filtering**

3x3 平均值 LPF 的比較



原始影像

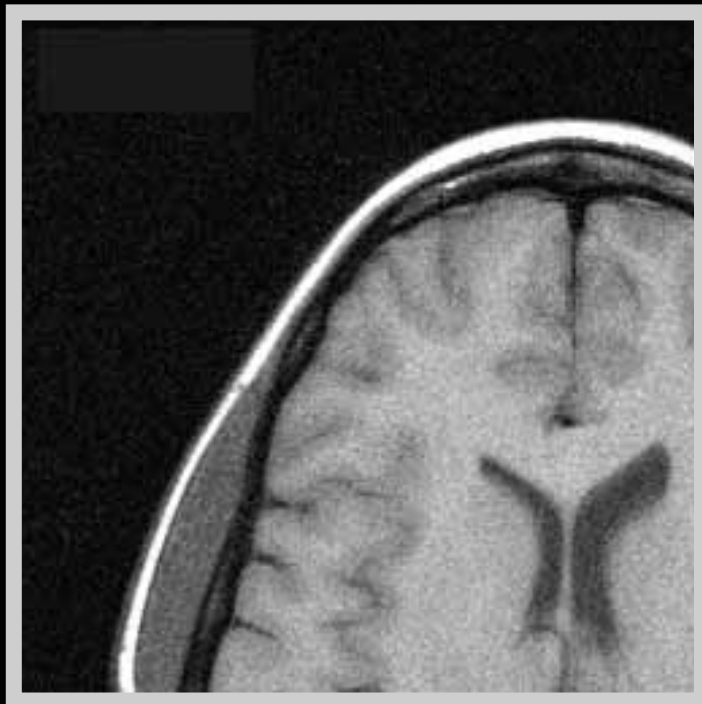


濾波後

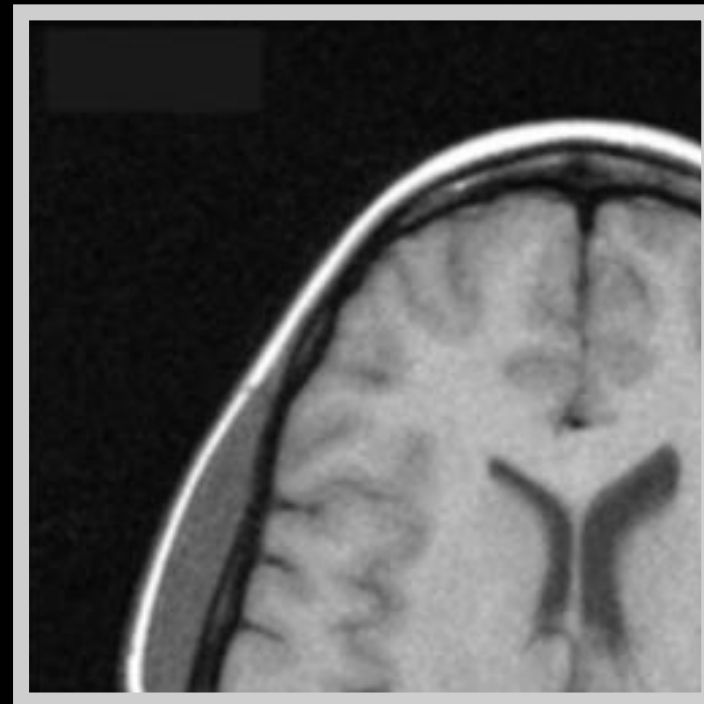
為什麼要這樣做？

- 影像必然會有雜訊 (noise)
 - 多數雜訊是 random events
 - 通常與鄰近 pixel 雜訊值無關
- 平均之後有雜訊減低效果

3x3 平均值 LPF 的比較 (局部放大)



原始影像



濾波後

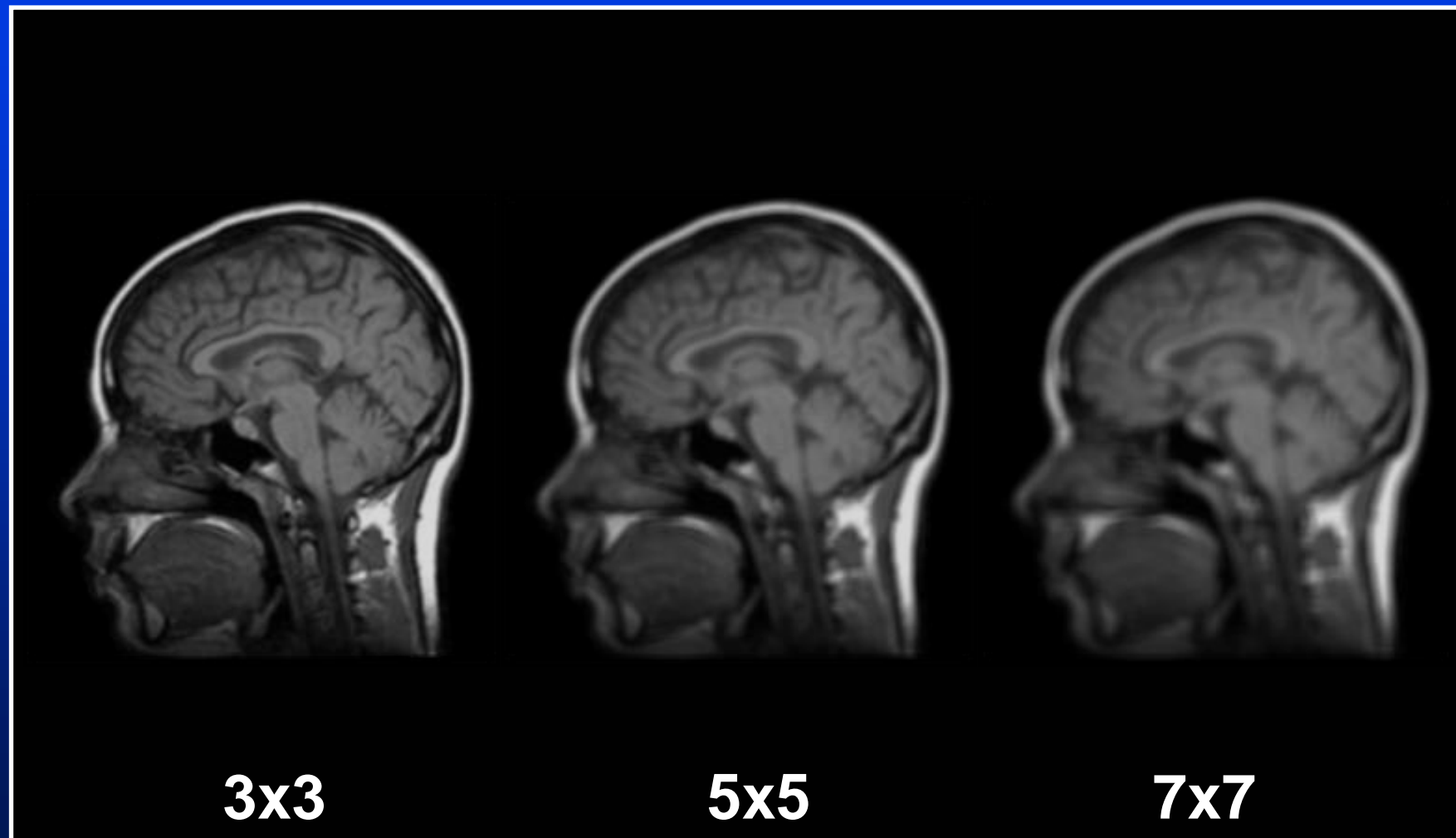
觀念延伸

- **5x5 averaging filter**
- **7x7 averaging filter ...**
- 雜訊消除更多
- 模糊現象也愈明顯

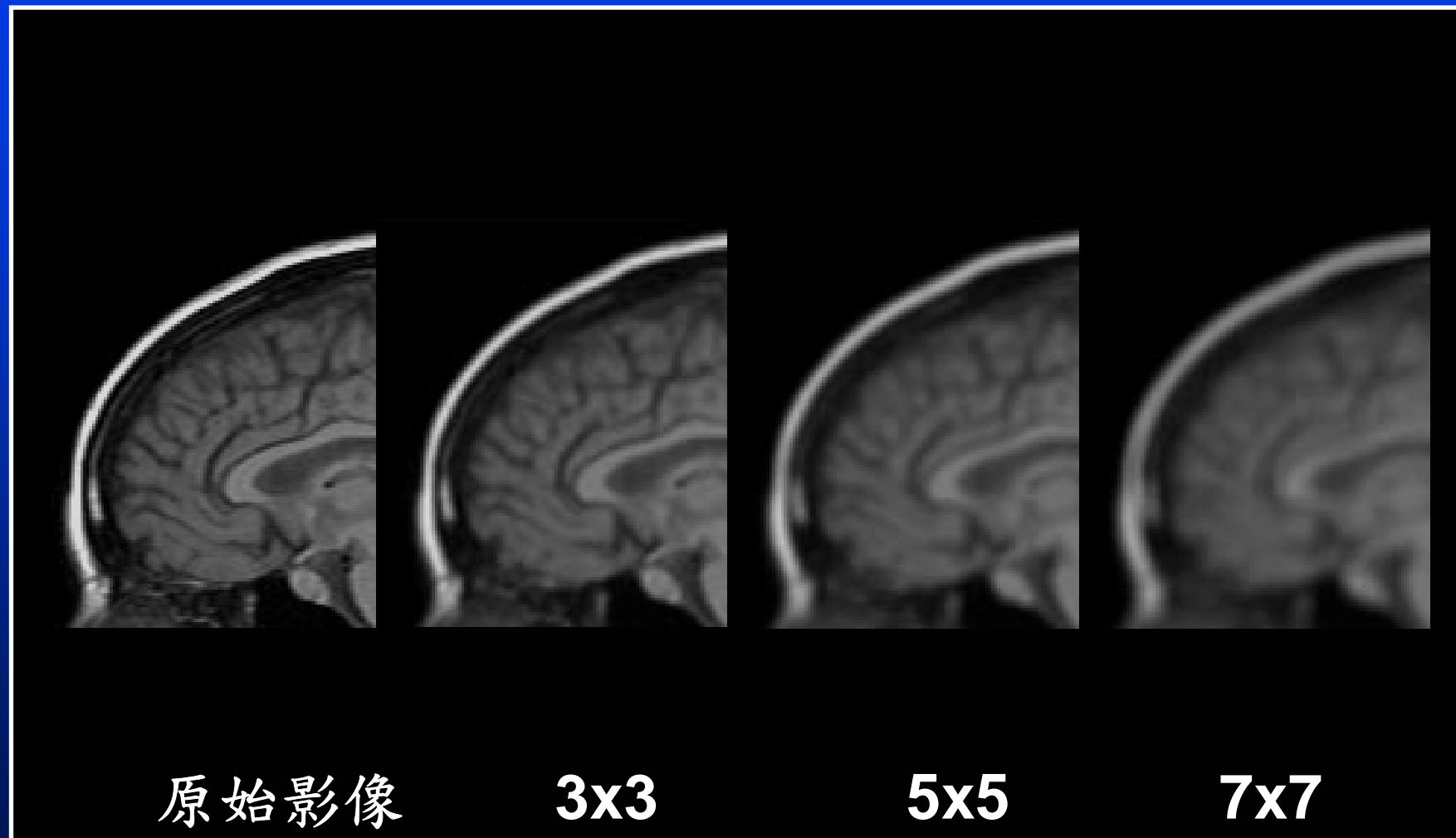
一點點數學 ...

- SNR 正比於 $\sqrt{\text{平均次數}}$
 - SNR = signal-to-noise ratio
- 3x3 averaging : 三倍改進
- 7x7 averaging : 七倍改進

平均值 LPF 的比較



平均值 LPF 的比較 (放大)



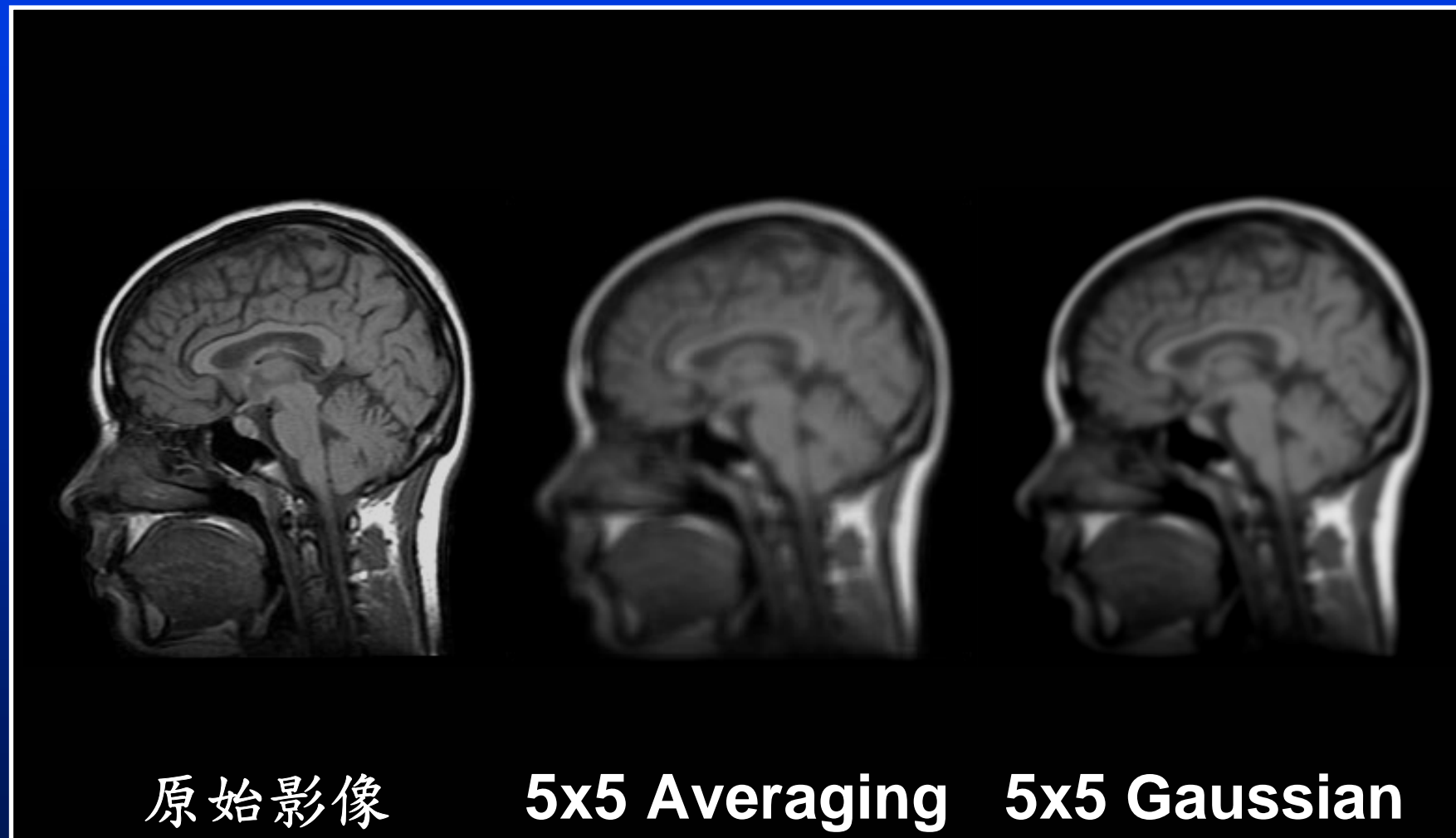
繼續延伸 (LPF)

- 距離較遠的 **pixels** 應屬於不同組織
 - 濾波是為了減低雜訊，而不是為了混淆不同組織
- 賦予鄰近 **pixel** 不同比重 (愈遠愈小)

加權平均

- **Weighted averaging**
- 最常見的方式：採用「與中心 pixel 之距離」的遞減函數做為加權依據
- **高斯函數 (Gaussian averaging)**

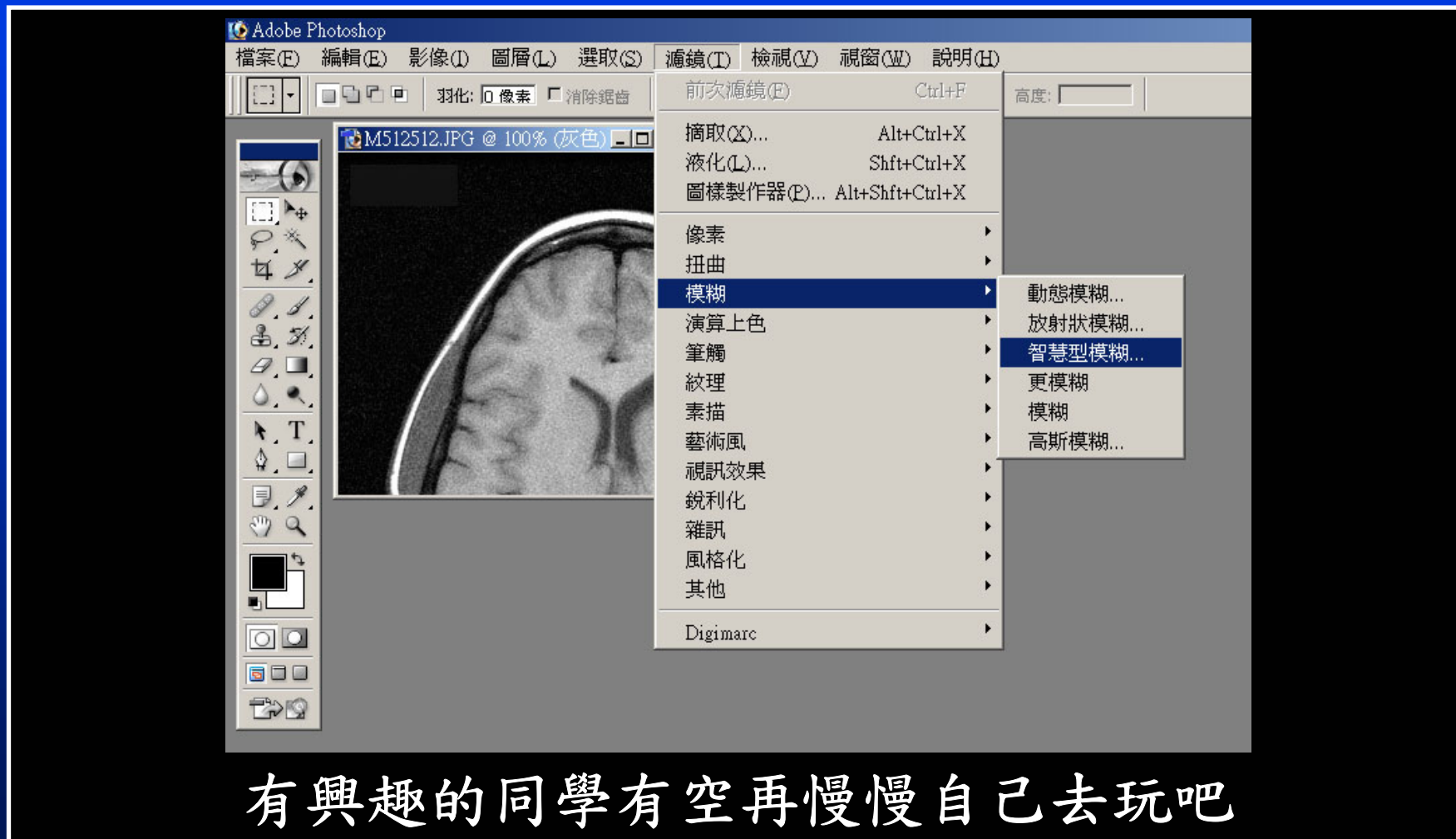
LPF 的比較



稍微打個岔 ...

- **Adobe Photoshop (繪圖藝術軟體)**
- 濾鏡功能選項
 - 模糊、更模糊、高斯模糊 ...
- 幾乎都脫離不了剛才的範圍

Adobe Photoshop 濾鏡功能選項



有興趣的同學有空再慢慢自己去玩吧

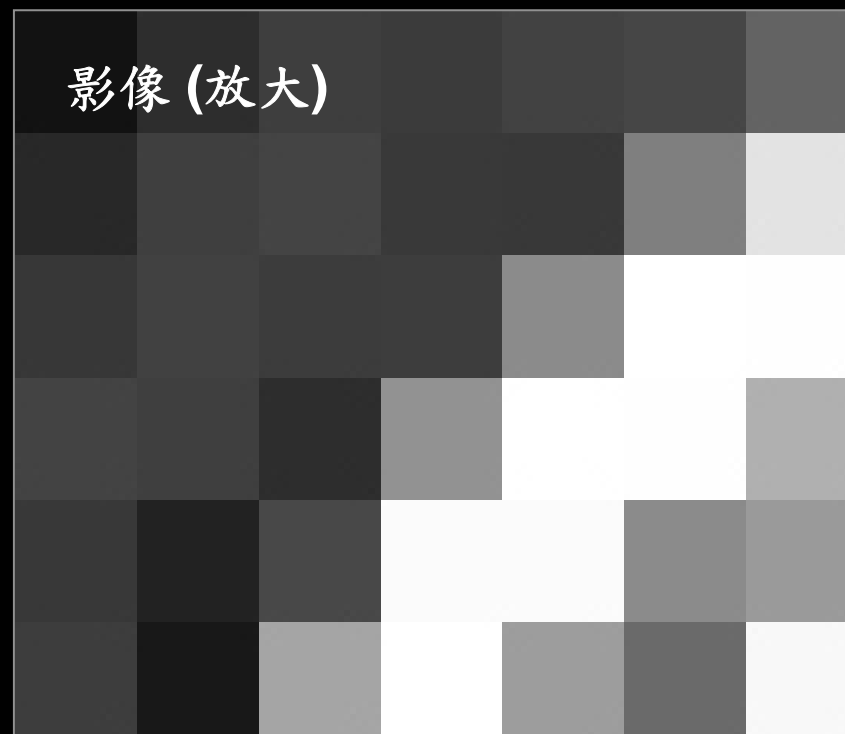
上述方式的數學表示法

- 影像與一個 **kernel** 作 **convolution**
 - 或稱 **mask**、**operator** ...
- **Convolution in the image domain**
- 底下仔細看 **convolution** 的運算

Convolution 運算過程

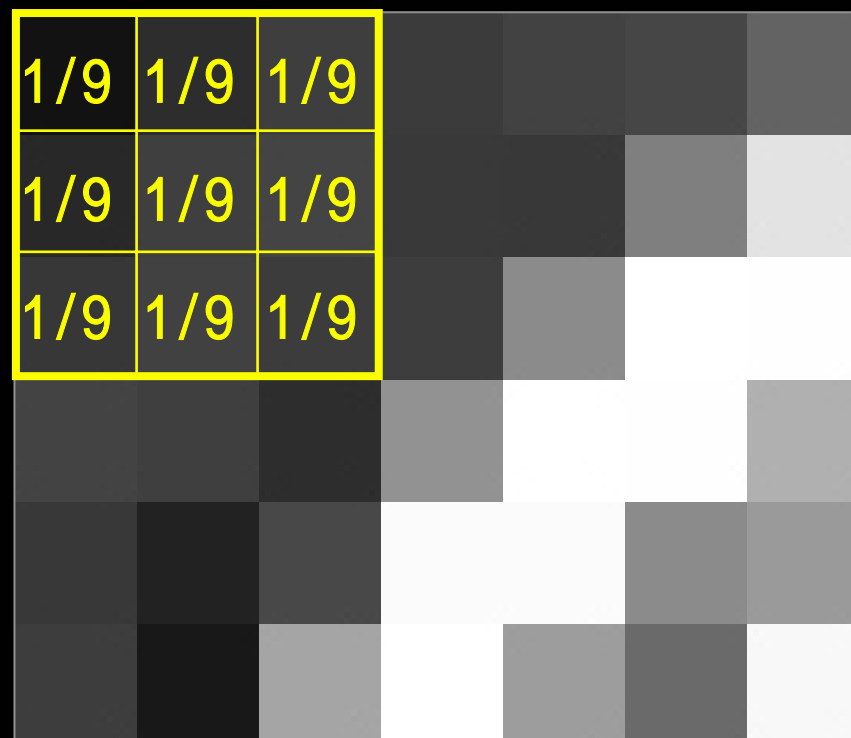
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Kernel



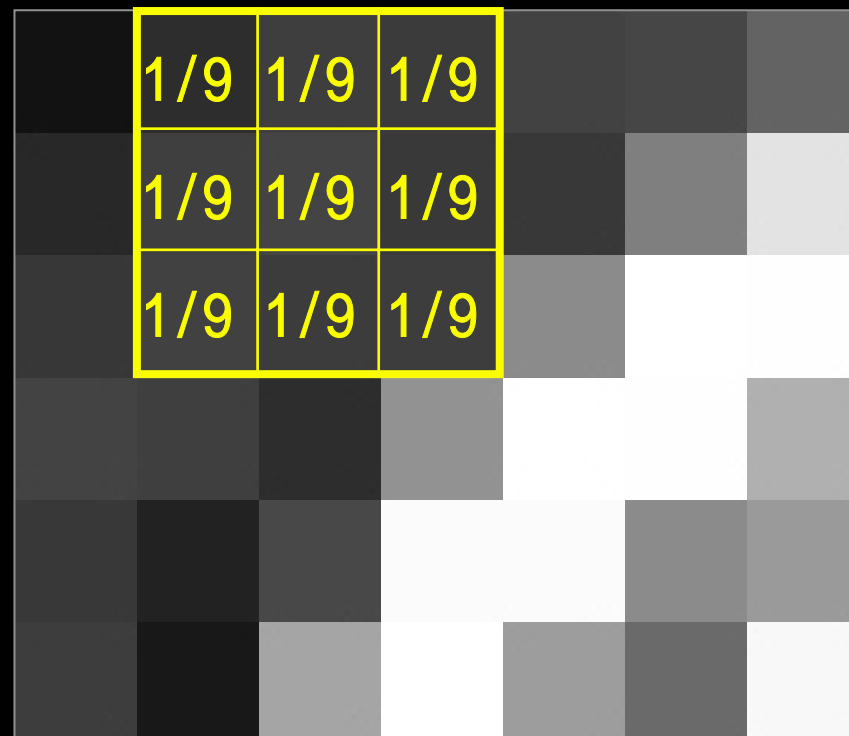
選定一個 kernel 把影像拿來 ...

Convolution 運算過程



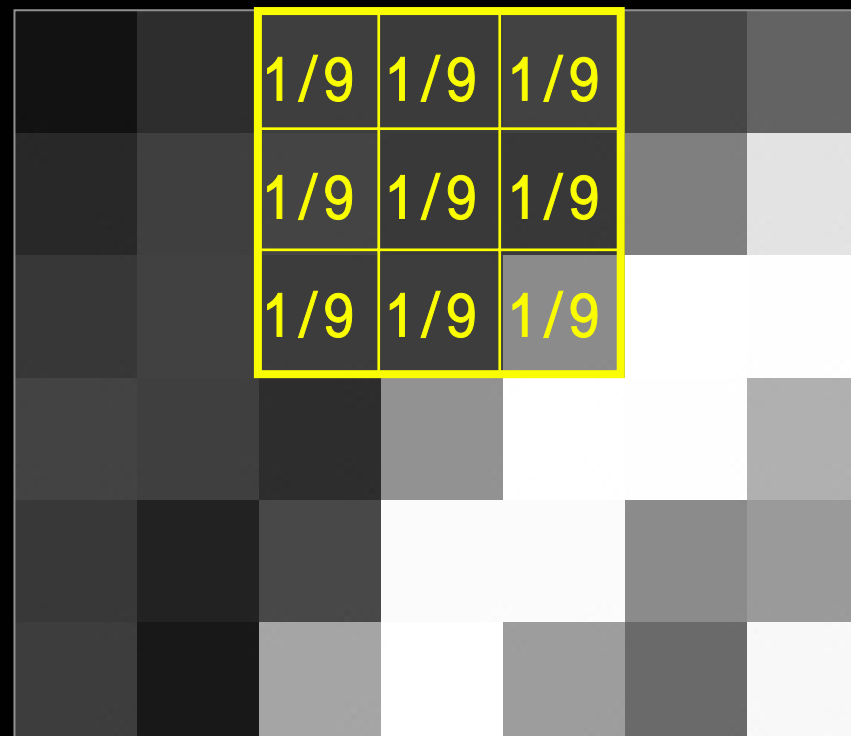
對應的 **pixel** 數值相乘 然後加總 移到下一格

Convolution 運算過程



對應的 **pixel** 數值相乘 然後加總 移到下一格

Convolution 運算過程



對應的 **pixel** 數值相乘 然後加總 移到下一格

Convolution 運算過程



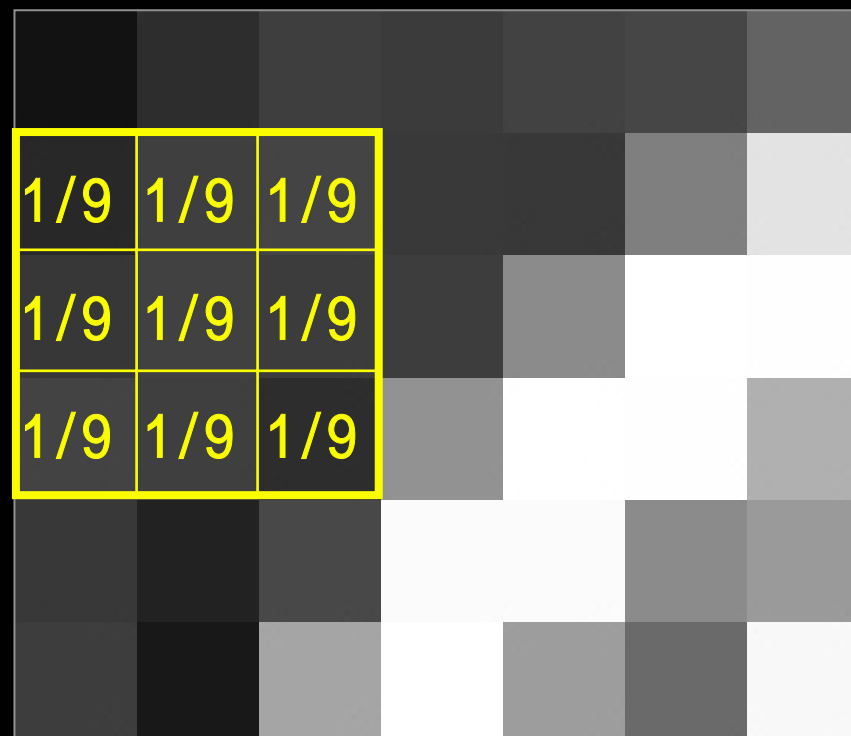
對應的 **pixel** 數值相乘 然後加總 移到下一格

Convolution 運算過程



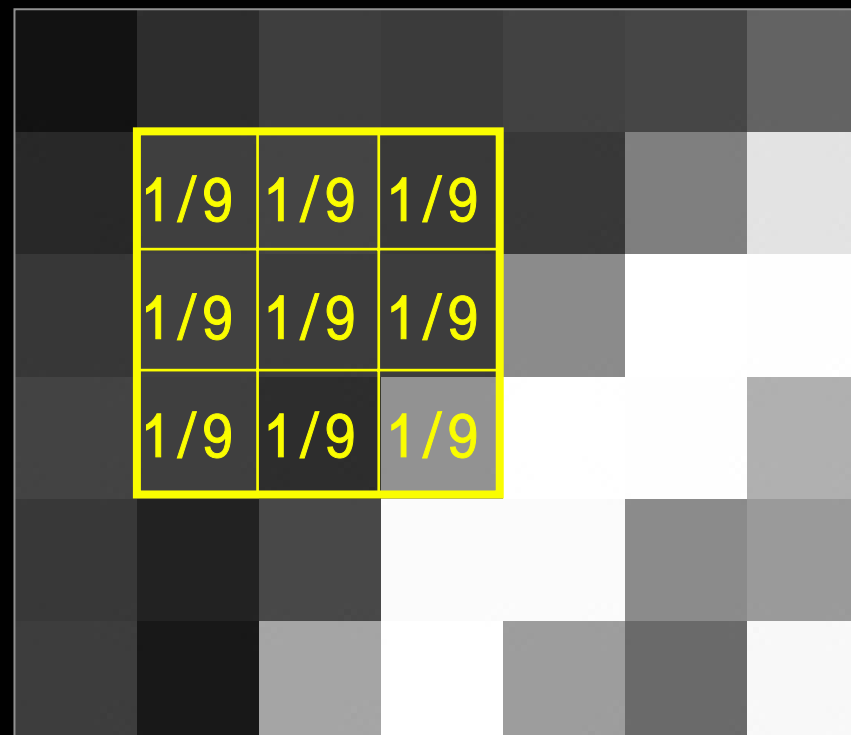
對應的 **pixel** 數值相乘 然後加總 移到下一格

Convolution 運算過程



對應的 **pixel** 數值相乘 然後加總 移到下一格

Convolution 運算過程



以下依此類推

影像濾波的數學表示法

- 影像濾波 = 與一個適當的 **kernel** 作 **convolution** 運算
 - 3x3 averaging kernel ...
 - 7x7 Gaussian kernel ...

一些 LPF Mask Kernels

$1/9$	$1/9$	$1/9$
$1/9$	$1/9$	$1/9$
$1/9$	$1/9$	$1/9$

3x3 average

$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$

5x5 average

3x3 weighted mean

0	$1/8$	0
$1/8$	$1/2$	$1/8$
0	$1/8$	0

再繼續延伸

- 方向選擇性濾波
 - 垂直方向 LPF、水平方向不動
 - 45° 斜角 LPF ...
- 只要變化 mask operator 就可以了

Directional LPF Mask Kernels

0	1/3	0
0	1/3	0
0	1/3	0

=

1/3
1/3
1/3

3x3 vertical average

1/3	0	0
0	1/3	0
0	0	1/3

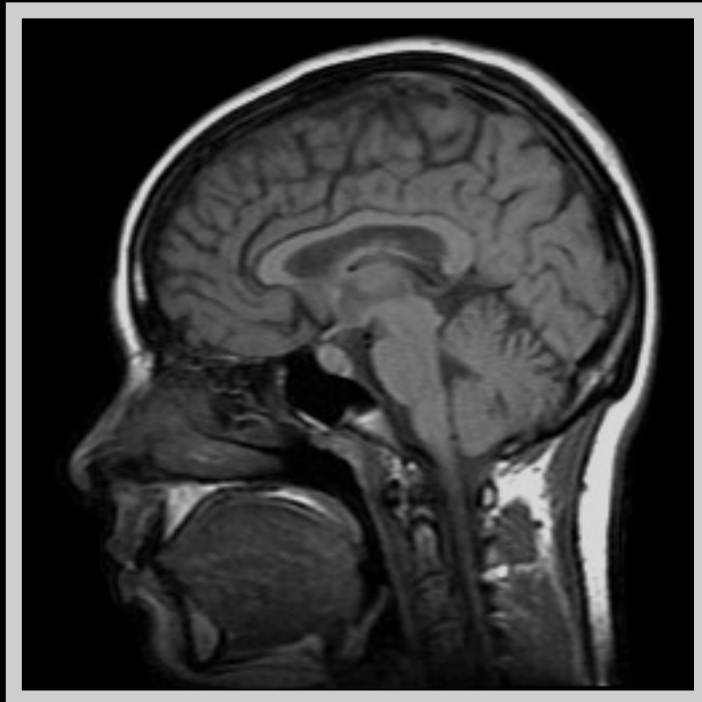
3x3 45° average

1/62 x

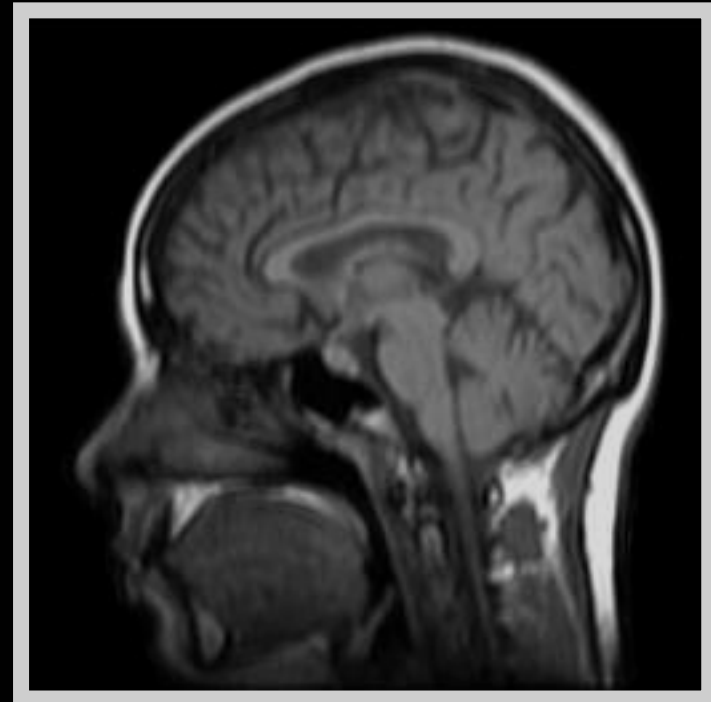
1	6	15	20	15	6	1
---	---	----	----	----	---	---

1x7 horizontal Gaussian average

5x5 垂直濾波

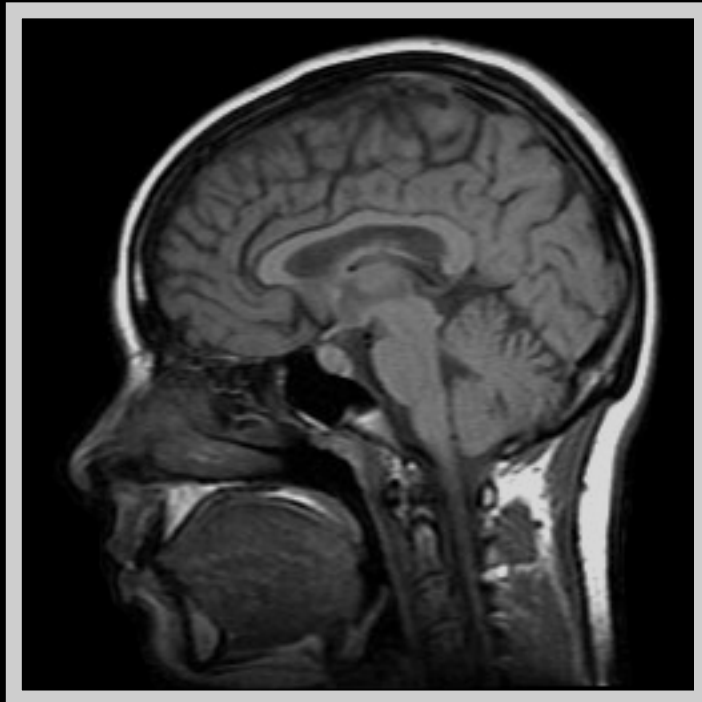


原始影像

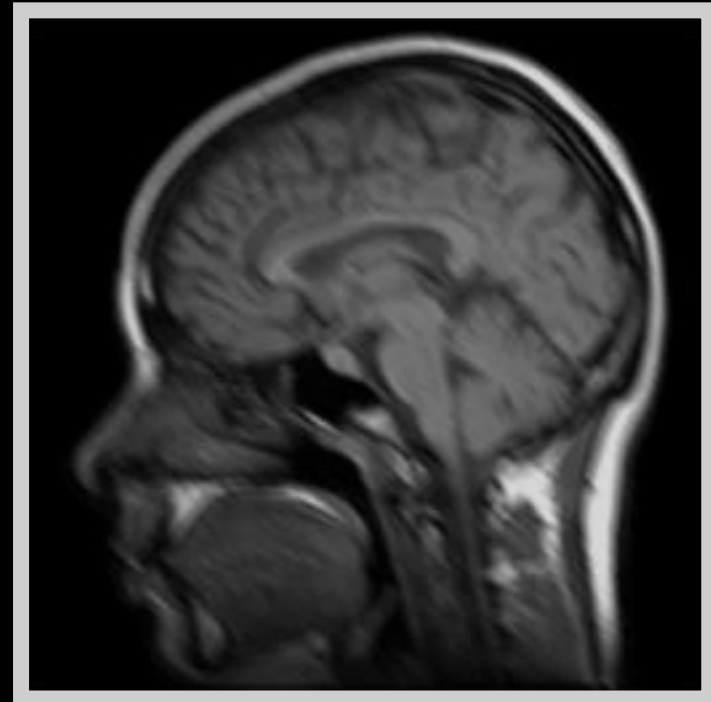


濾波後

5x5 斜向濾波



原始影像

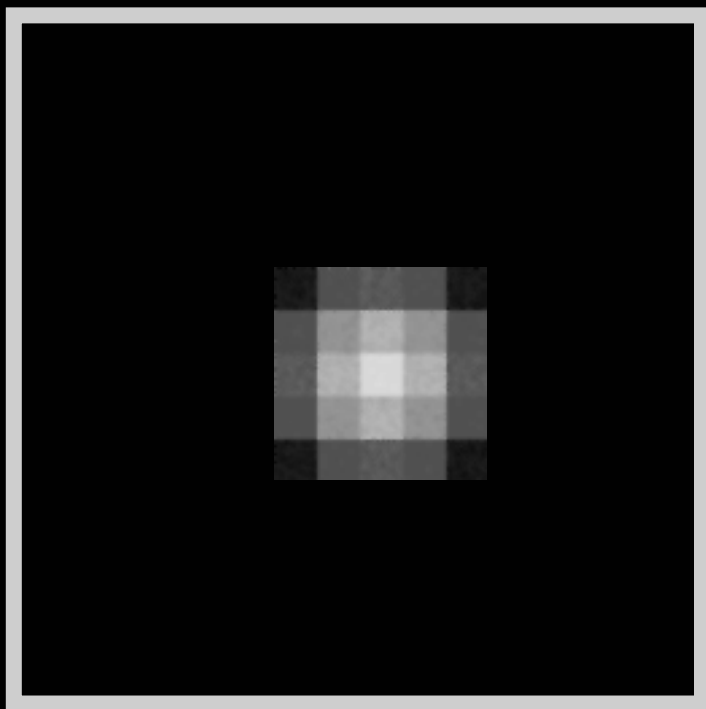


濾波後

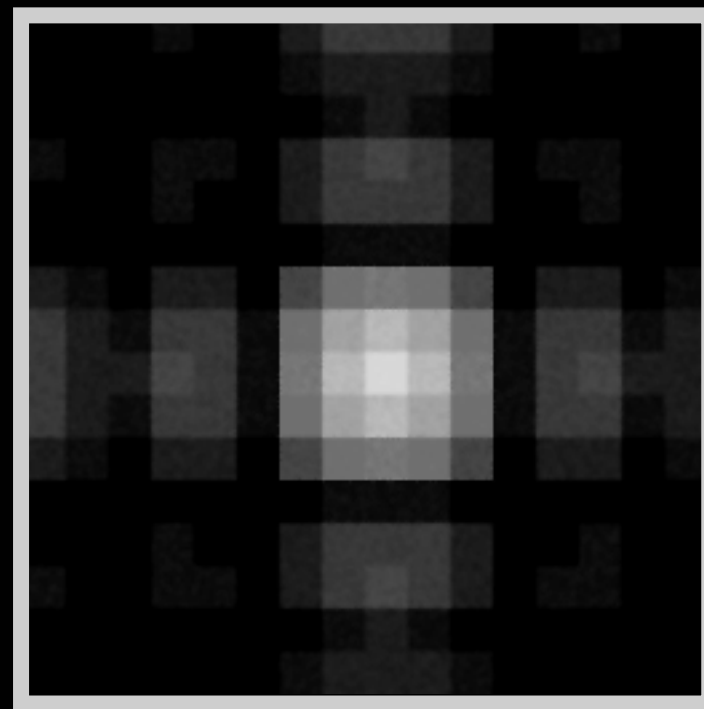
用 Mask 的方式 ...

- 稱為 FIR filters
 - Finite impulse response
- 那 infinite impulse response 呢？
- Frequency domain 濾波器

FIR 與 IIR Filters 的 Impulse Response



只延伸到有限距離

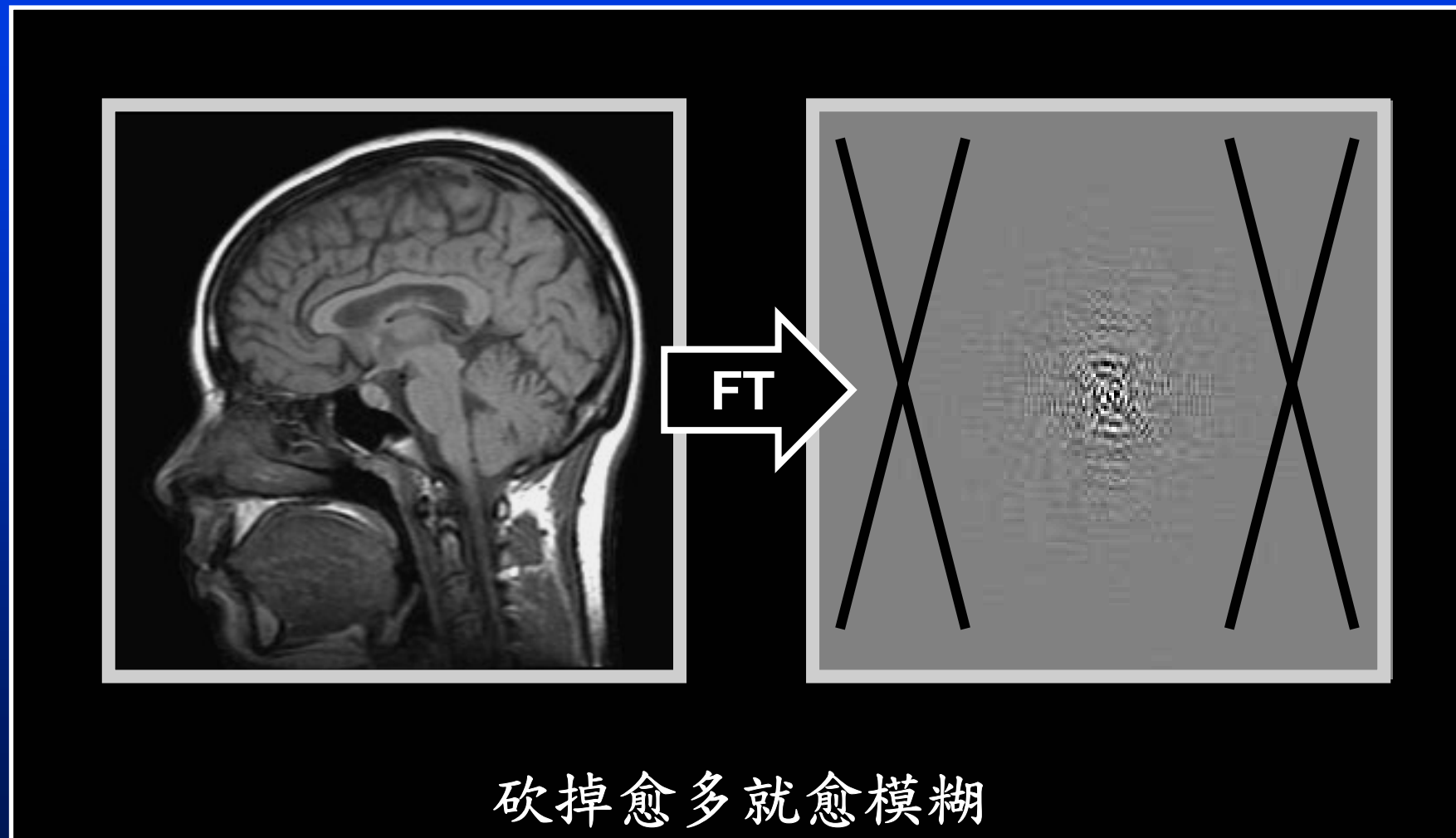


延伸到影像邊界

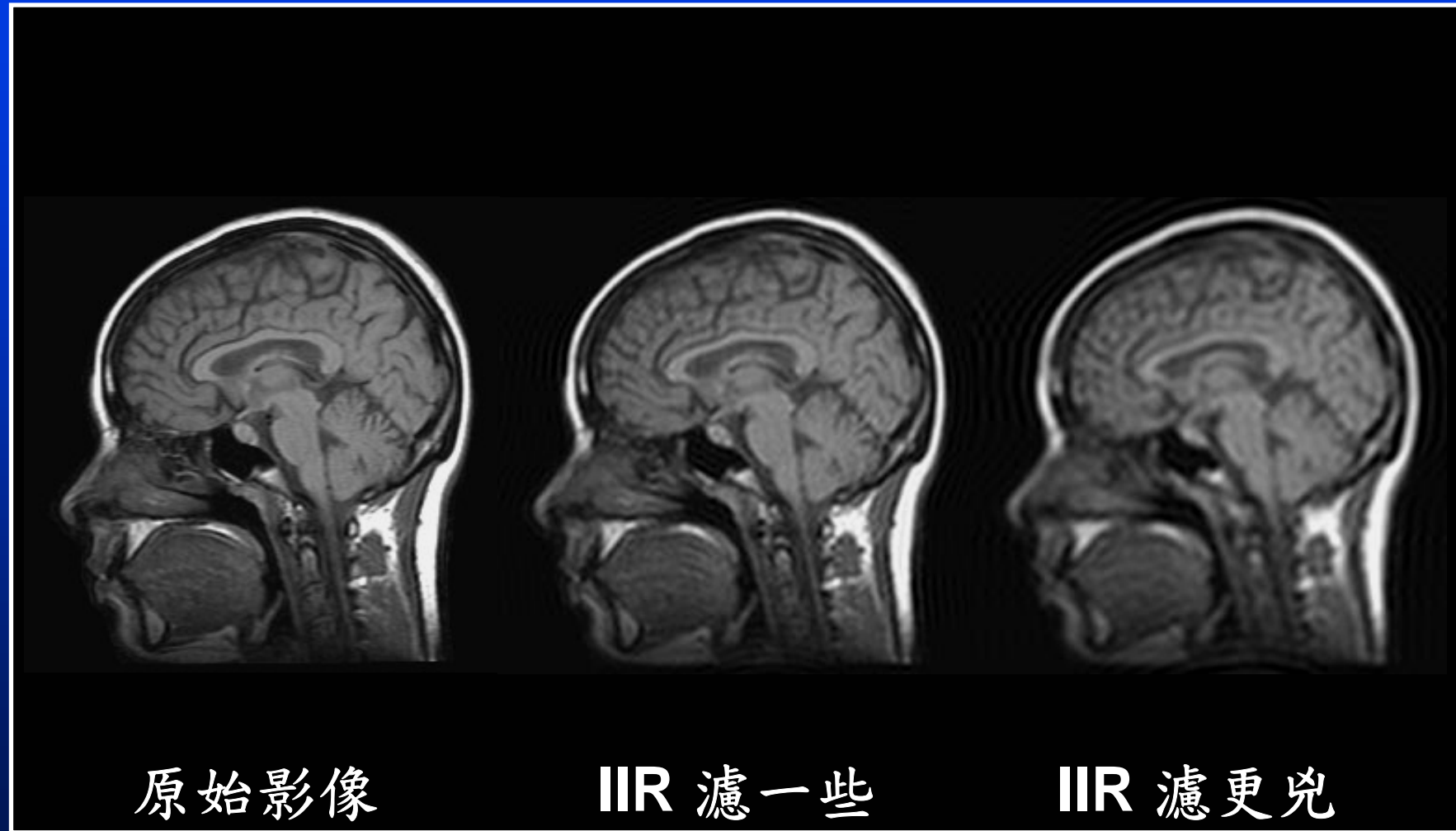
IIR Filter 的濾波方式

- 影像經 2D 傅立葉轉換轉至頻域
- 在頻域中直接砍掉或減少部份成份
- 再將修改過的頻譜轉回影像
- **Filtering in the freq domain**

IIR Low-Pass Filter 的步驟



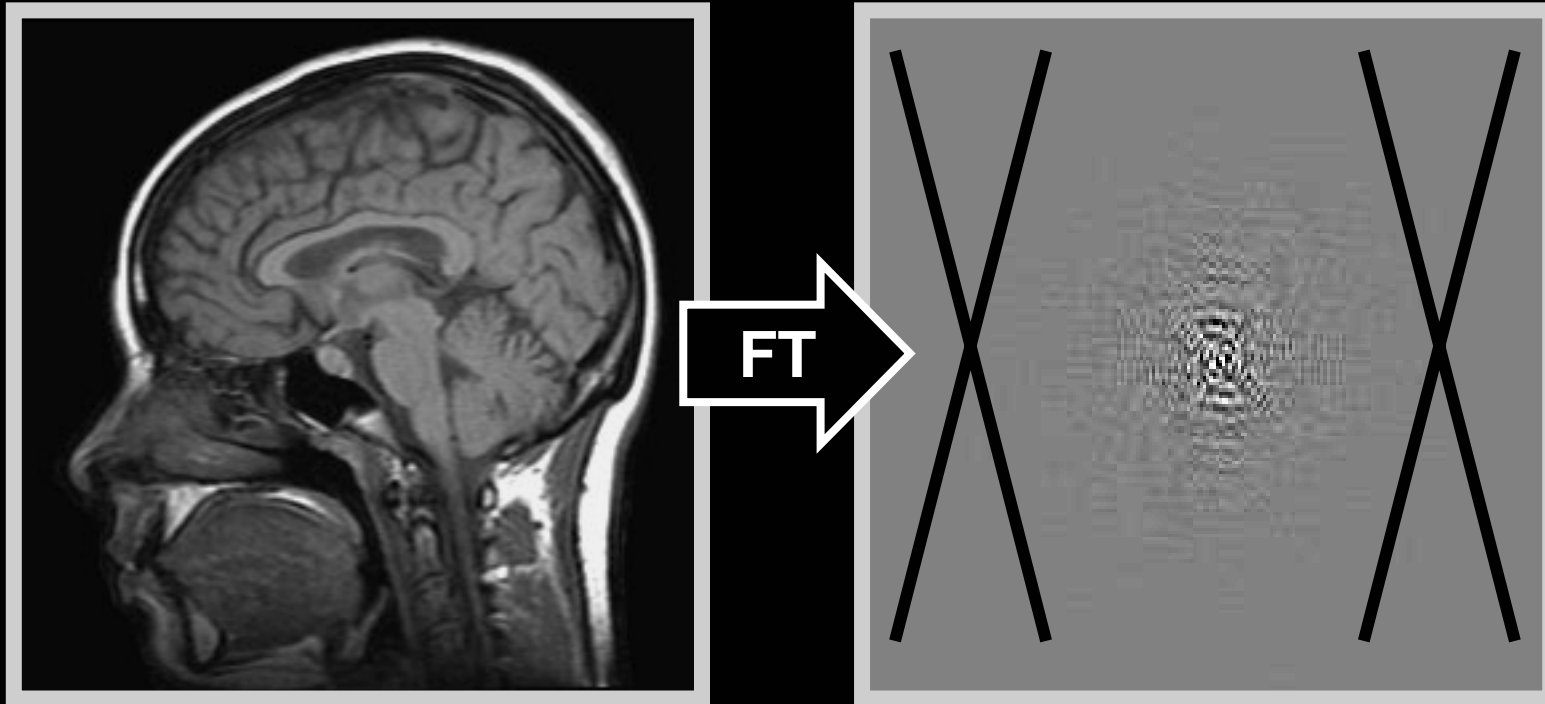
Infinite Impulse Response Filters



波紋的出現

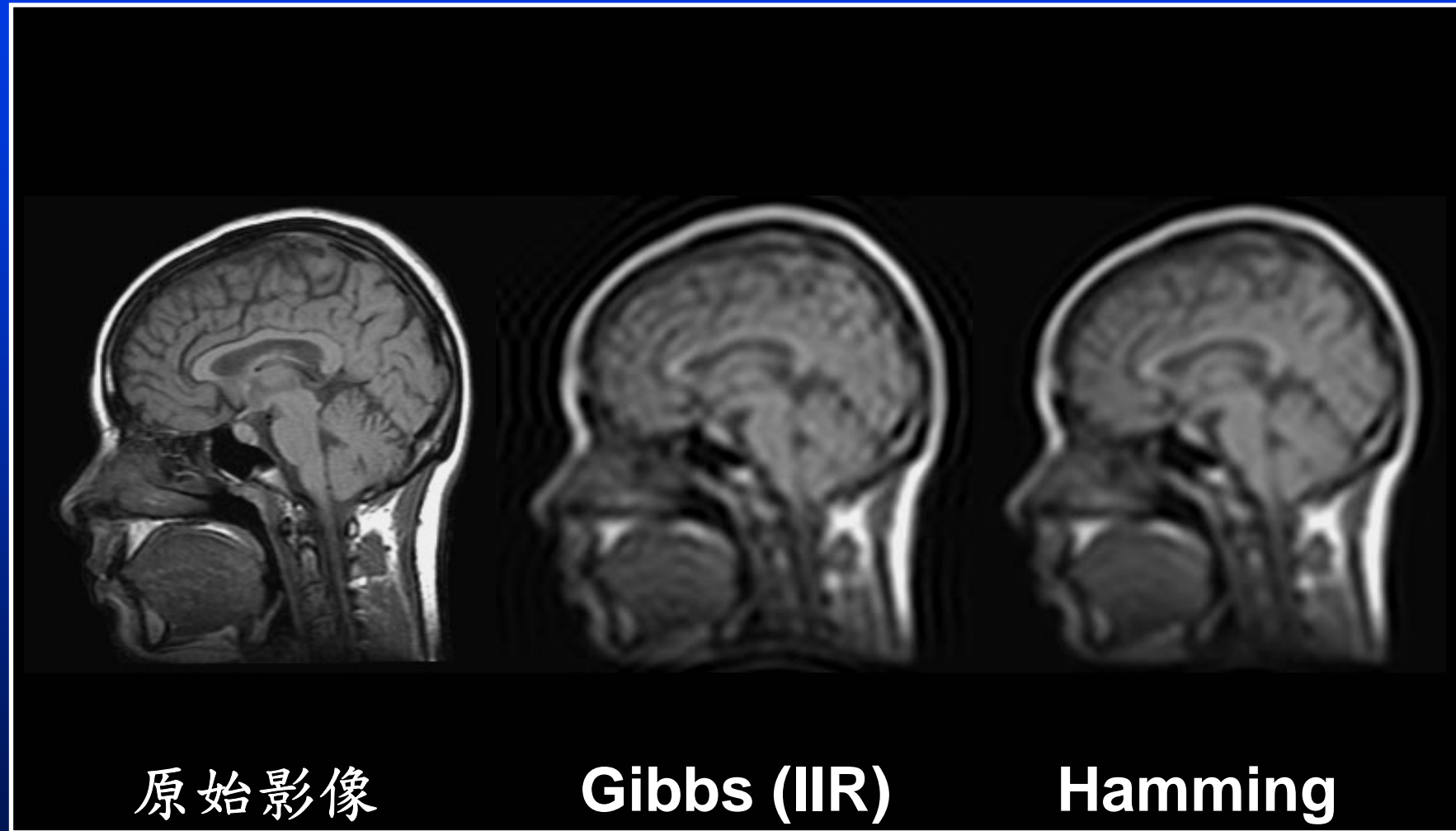
- **Gibbs (ringing) phenomenon**
- 可用 **windowing** 減少
- 典型例：**Hamming window**
 - $0.54 + 0.46 \cdot \cos(u)$

Windowing 減少 Ringing



乘上逐步遞減函數 而不是冒然砍掉數據

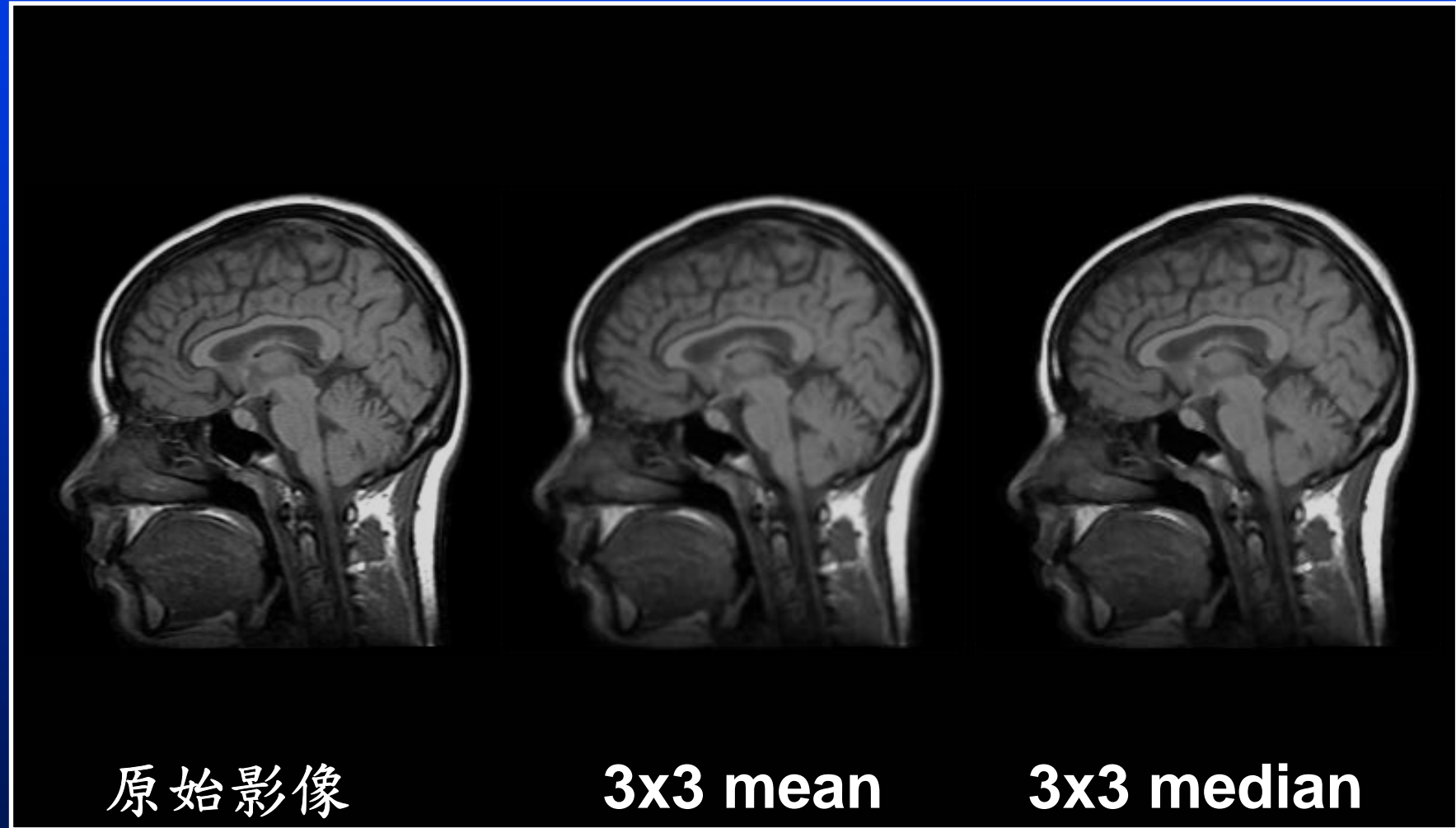
Windowing for IIR Filters



非線性濾波器

- 例：中位數濾波器 (median filter)
 - 3x3 或 7x7 的中位數
 - LPF 但保持邊界清晰度
 - 不受單一數值過大的影響

Median Filter 的比較



非線性濾波器

- 例：適應性 (adaptive) 濾波器
 - 根據邊界對比局部調整 **kernel**
 - 或限制 **kernel** 在特定部份的作用
- 其他變化不勝枚舉！

Edge enhancement

- High pass filter 的觀念就是了
- 直接從 LPF 變化而來
- 把相加 (平均) 改為相減
 - 只突顯鄰近 pixel 亮度不同處

一些 HPF Mask Kernels

1	-1
---	----

vertical edge finder

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

1	-2	1
-2	4	-2
1	-2	1

3x3 Laplacian operators

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

3x3 Sobel

一些 HPF Mask Kernels

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

0	1	1
-1	0	1
-1	-1	0

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

1	1	0
1	0	-1
0	-1	-1

1	0	-1
1	0	-1
1	0	-1

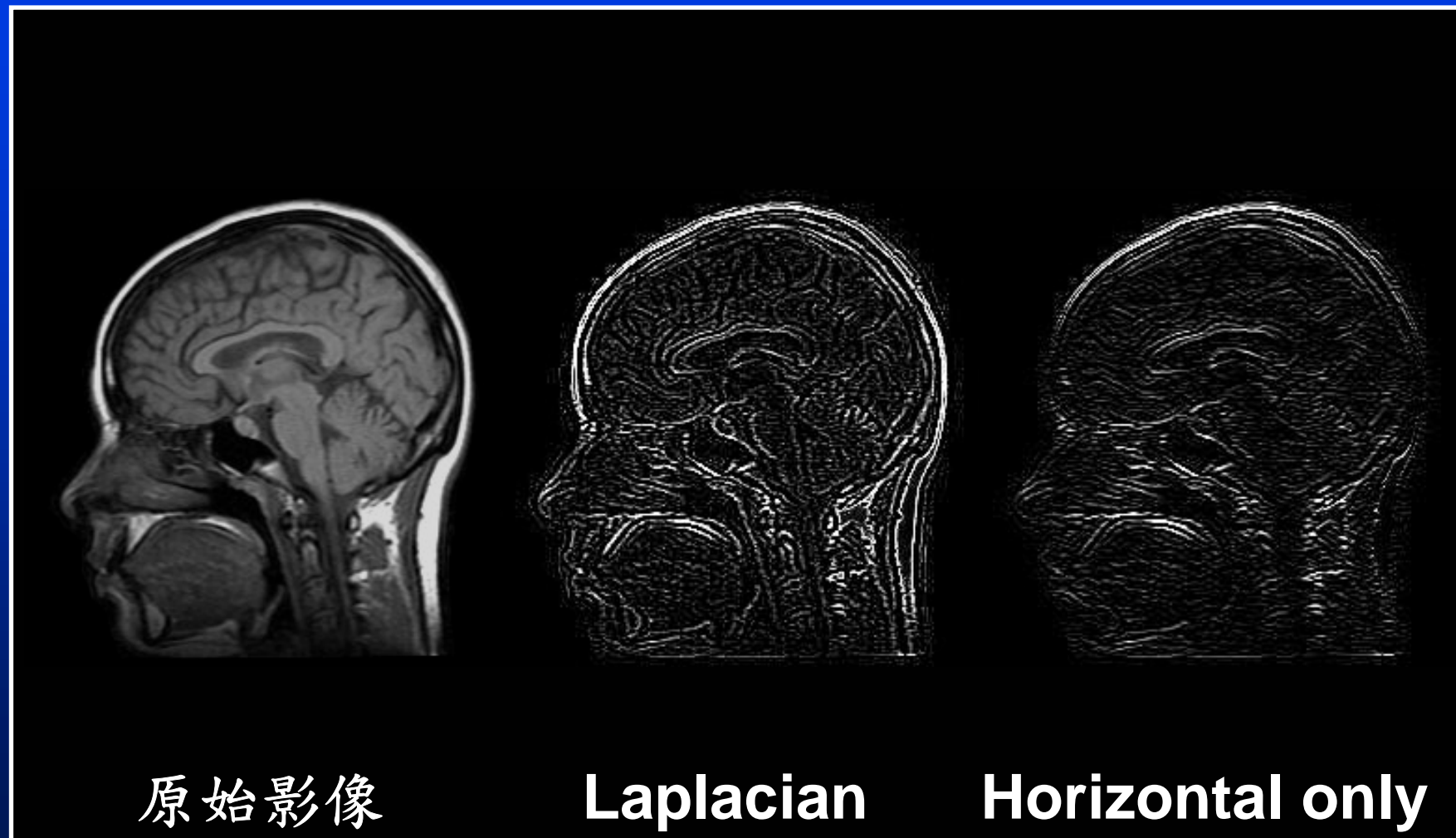
0	-1	-1
1	0	-1
1	1	0

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

-1	-1	0
-1	0	1
0	1	1

Compass gradient operators

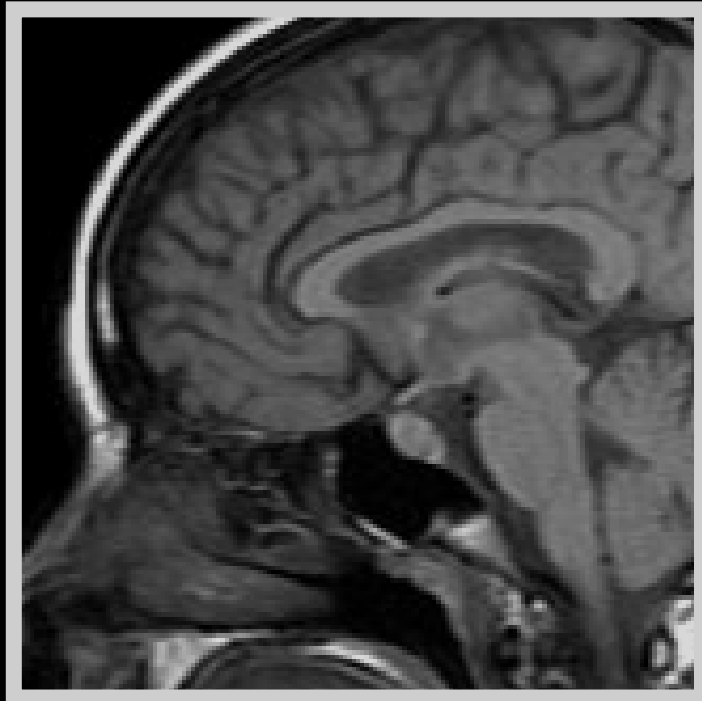
3x3 Laplacian HPF 的比較



繼續連成清楚的邊界線呀！

- 那就沒那麼容易了 (超出課程範圍)
 - 邊緣不清楚造成 open contour
- **Active contouring (snake ...)**
 - 計算邊界線的局部曲率

邊緣的不確定性 (放大)

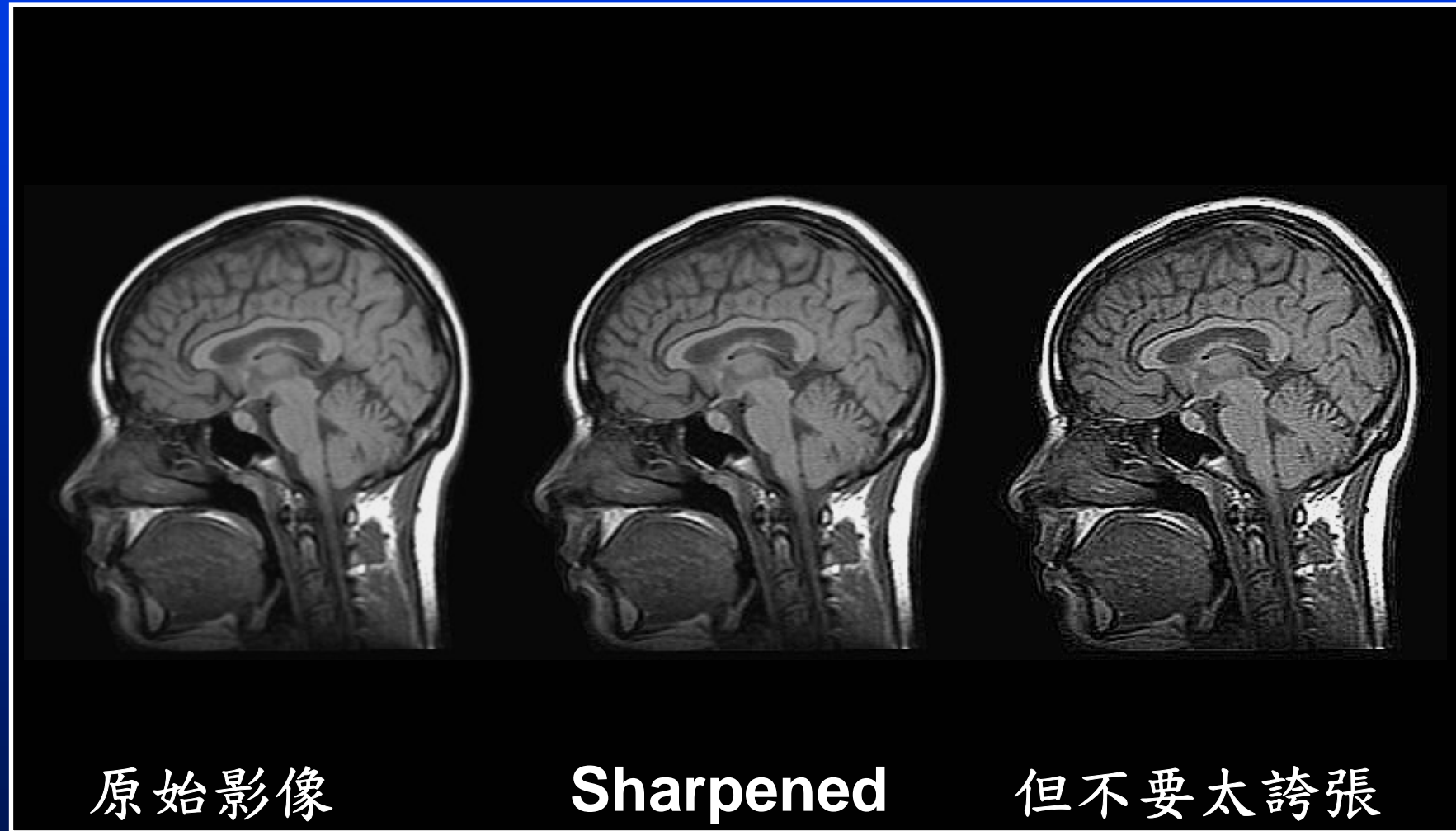


如何界定真實範圍？

突顯邊緣但保持對比

- 類似 HPF 但稍微不同
- Image sharpening (銳利化)
- (影像 - LPF) + 影像
- (影像 - LPF) x C + 影像

Sharpening Filter 的比較



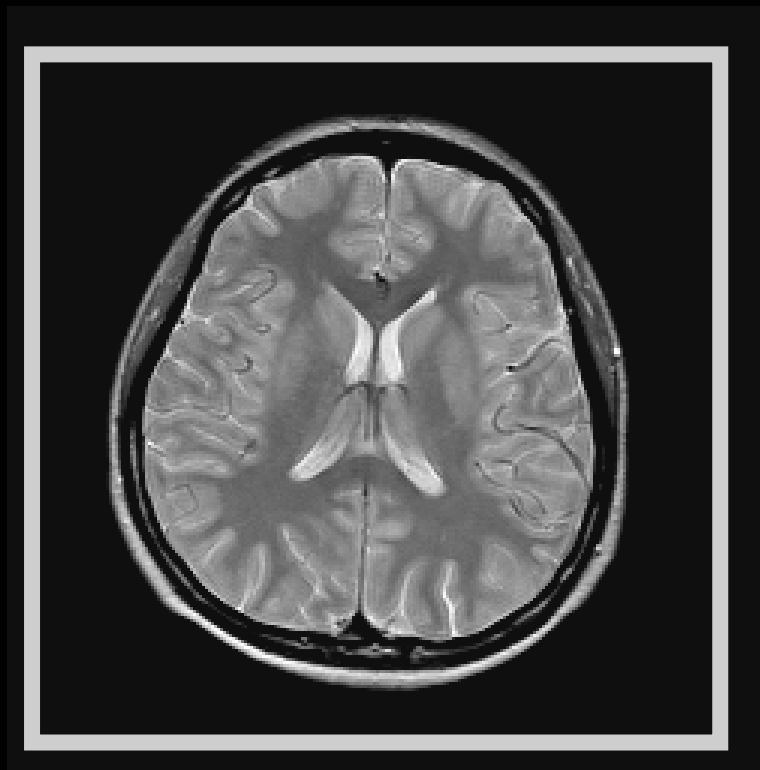
已經教了 LPF 和 HPF 了

- 那還需要教 BPF 嗎？
- 只是低通與高通的延伸而已
- 變化 mask operator 也可以
- 利用 Fourier domain 也可以

重要觀念

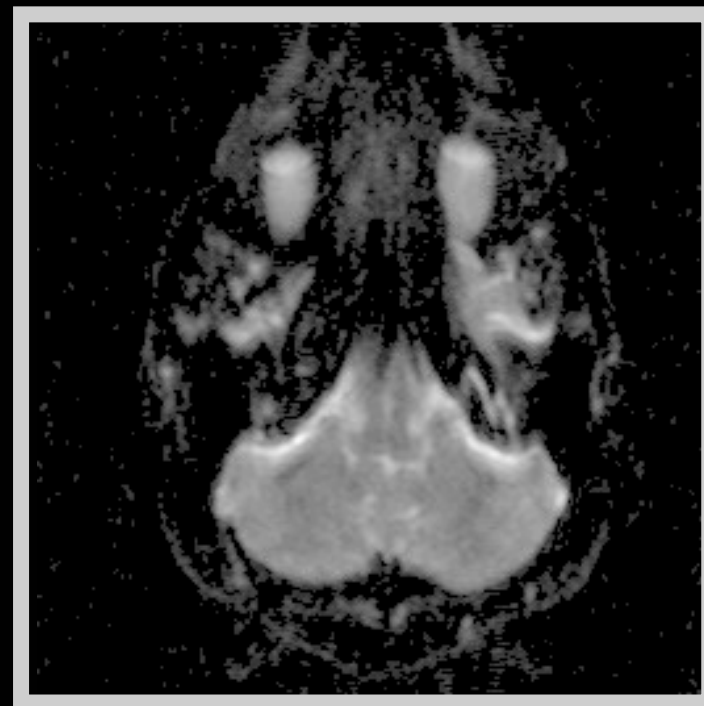
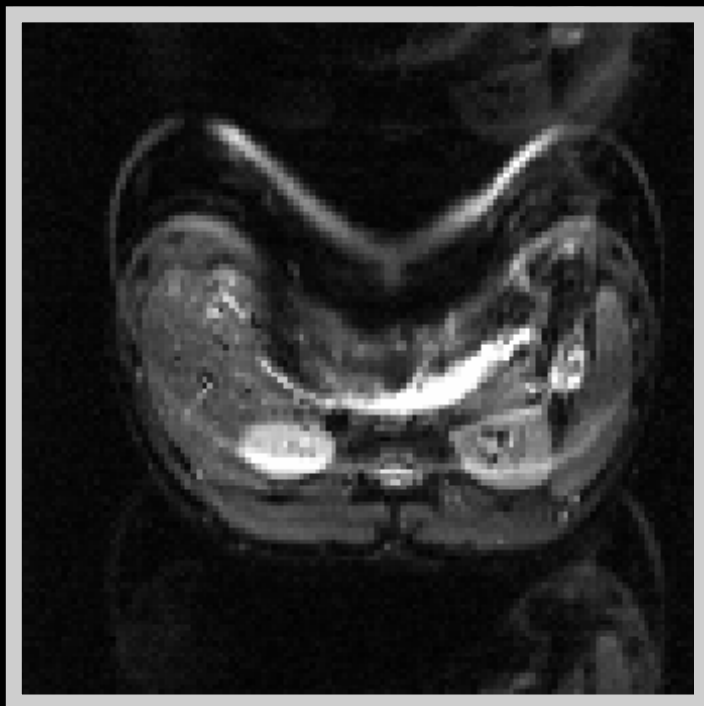
- 各種濾波方式都是後處理
 - Image post-processing
- 後處理只能 refine 影像
- 不能 create information

典型的高品質醫學影像



隨便濾波隨便漂亮

低品質醫學影像



你慢慢去濾波吧！我要下課去了...

Filter & Enhancement

- 工程上絕對有非常多的發展空間
 - Wiener, constrained, ...
- 但醫學上瓶頸很少出現在濾波方面
- 過多的後處理沒有人會相信

投影影像重建

Image Reconstruction

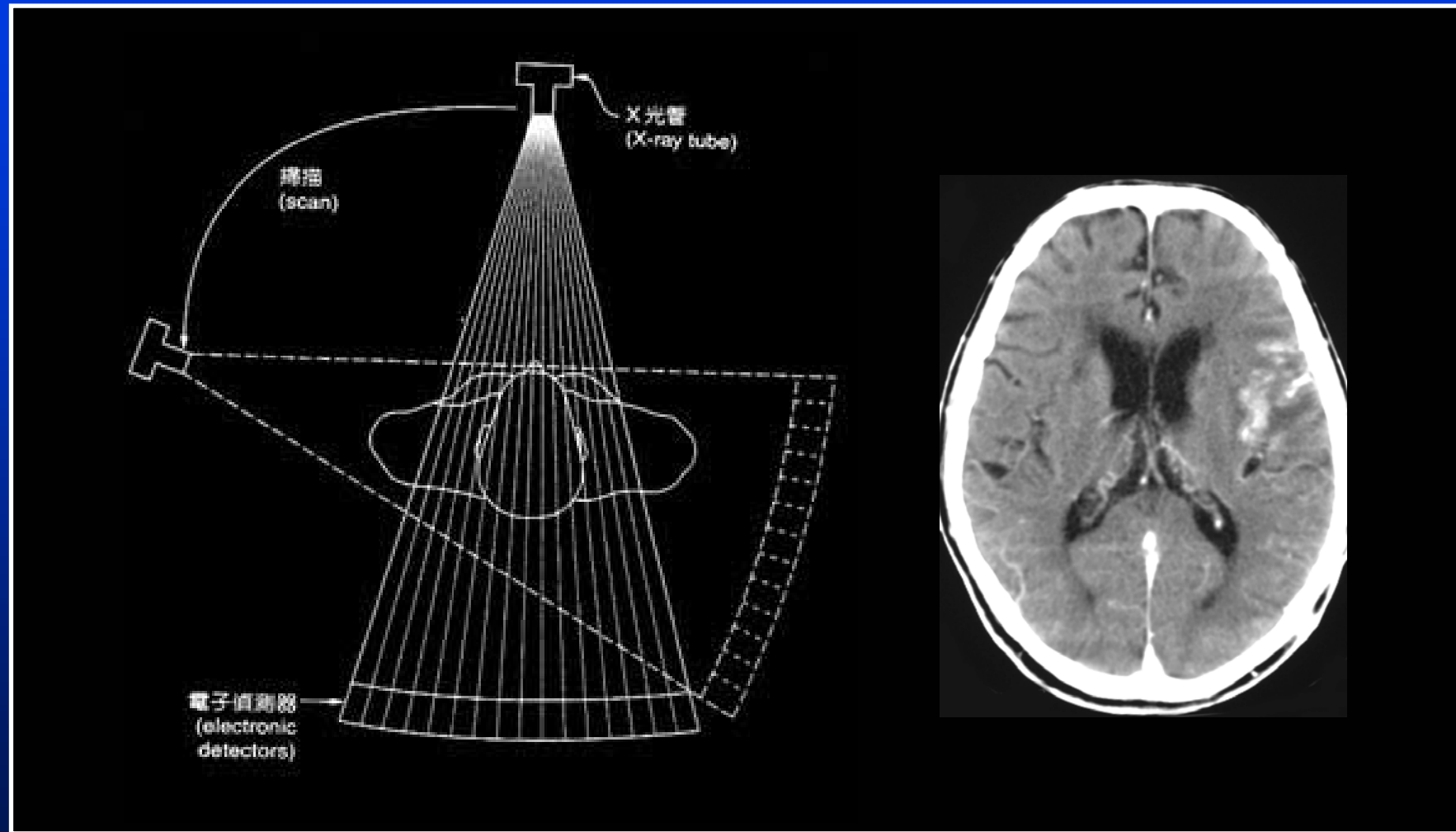
鍾孝文 教授

台大電機系 三軍總醫院放射線部

影像重建

- **Reconstruction from projections**
- 由投影重建原始影像
- 主要指 X 光電腦斷層攝影 (CT)
- 核子醫學也常使用 (SPECT, PET)

還記得電腦斷層嗎？



單光子斷層攝影呢？



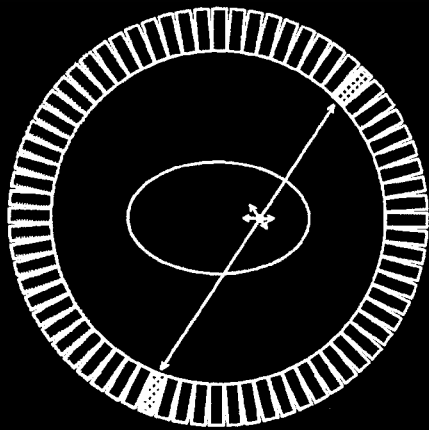
Triple head



transverse slice

SPECT image

Coincidence Detection in PET



PET 原理



PET 内部構造

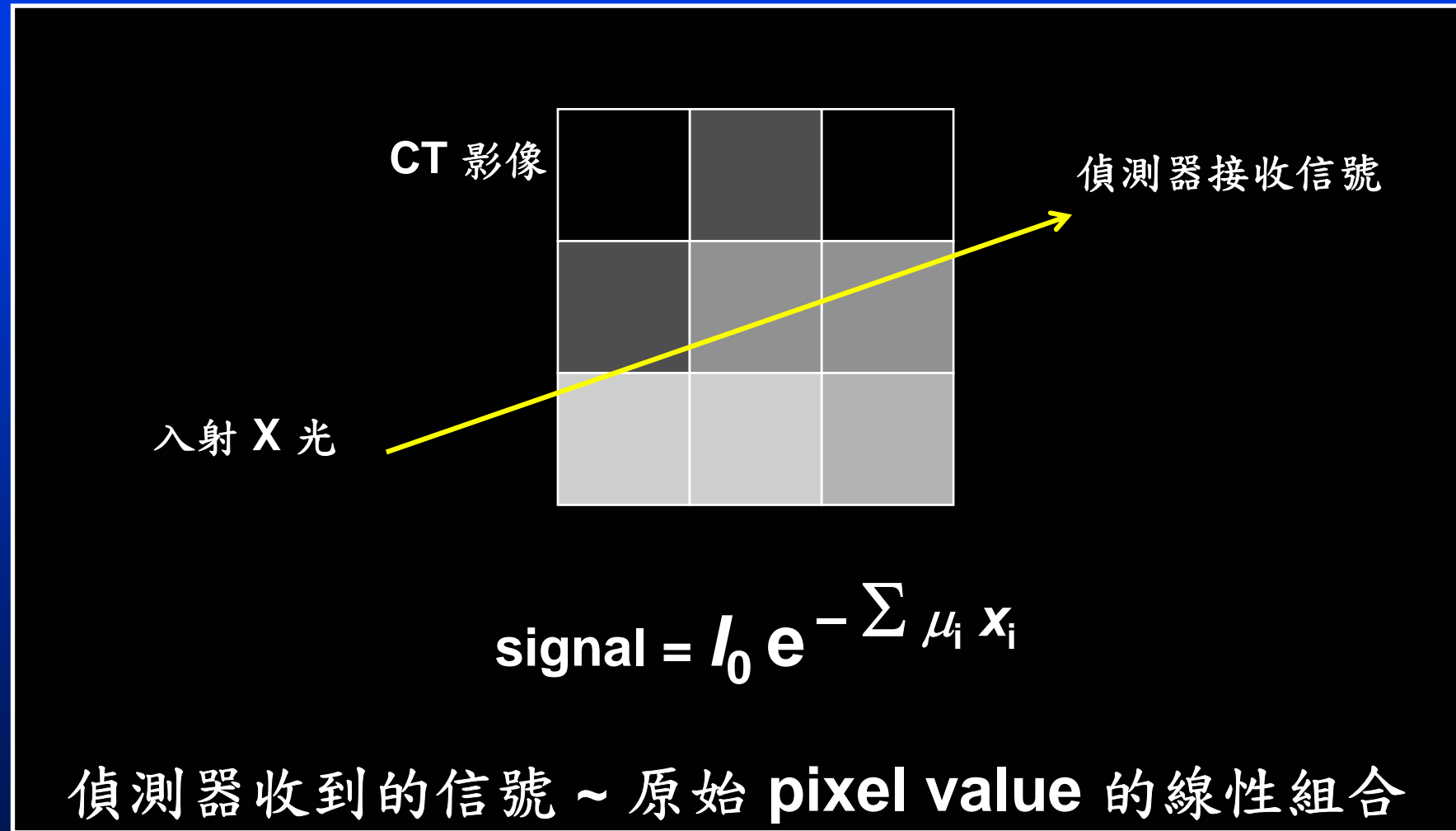
CT 的「發明」

- **Hounsfield & Cormack**
 - 1979 Nobel prize in Medicine
- **Oldendorf 1961**：仿體實驗
- **Radon 1917**：由投影重建影像

如何重建影像？

- 解聯立方程式 (反矩陣)
- 疊代法 (仍有不同方法在研究中)
- 二維傅立葉轉換
- **(Filtered) back projection**

Reconstruction from Projections



寫成矩陣數學形式 ...

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \\ X_{31} & \dots & & \\ X_{41} & \dots & & \\ X_{51} & \dots & & \\ X_{61} & \dots & & \\ \dots & & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \\ \mu_5 \\ \mu_6 \\ \dots \end{pmatrix}$$

↓
可測得

已知

↓
欲求 (影像)

解反矩陣就對了啦！

矩陣特性

- X 光走直線、所以只經過少數點
- **Sparse matrix** → 可簡化
 - **Jordan canonical form**
 - **Singular value decomposition**

解反矩陣的困難

- 影像 = 512×512
- 矩陣 = 262144×262144 !!
- 可行性到今天也只有在 16×16 的影像上證實過

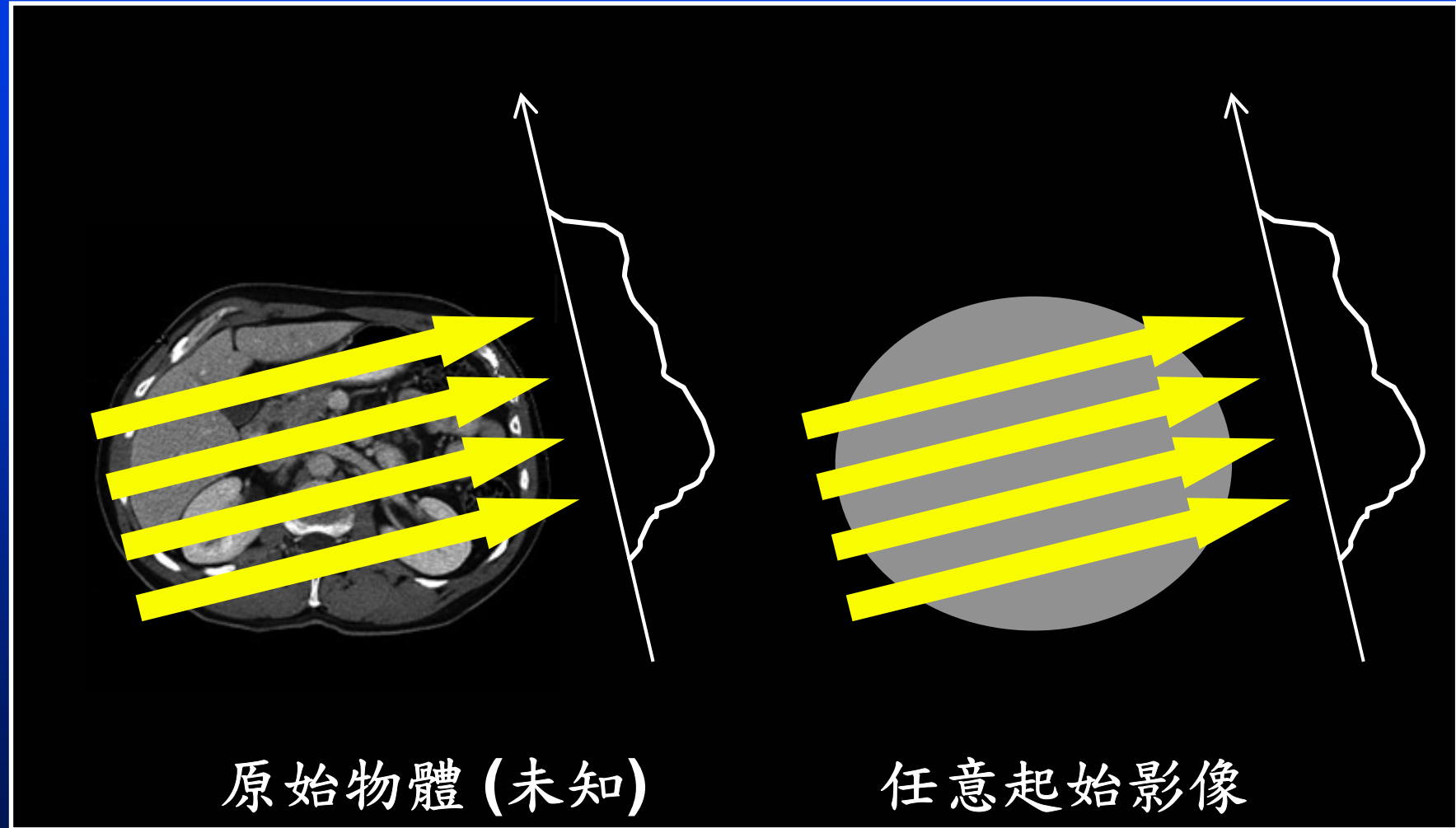
如何重建影像？

- 解聯立方程式 (反矩陣)
- 疊代法 (仍有不同方法在研究中)
- 二維傅立葉轉換
- **(Filtered) back projection**

疊代法 (Iteration)

- Algebraic Reconstruction Technique
- 任意假設一影像作起始值
- 求 **projection** 並與數據比較
- 根據比較誤差修正影像
- 反覆計算非常多次直到收斂

疊代法的說明



疊代法的缺點

- 計算量龐大，費時甚久
- 演算法不保證收斂
- 與商用軟體計算結果差異有限
- 號稱精確但醫界不太重視

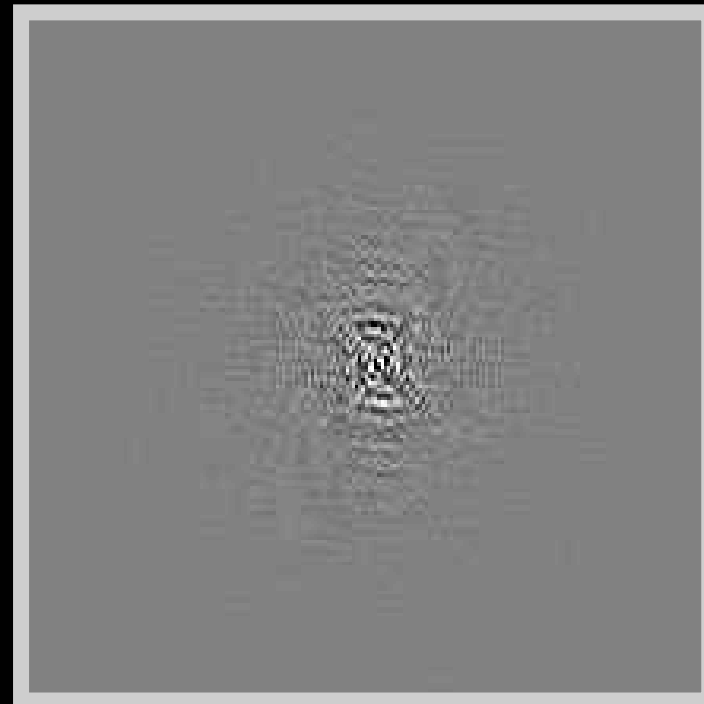
如何重建影像？

- 解聯立方程式 (反矩陣)
- 疊代法 (仍有不同方法在研究中)
- 二維傅立葉轉換
- **(Filtered) back projection**

Fourier Transform 重建 CT 影像



原始物體影像



二維傅立葉轉換

二維傅立葉轉換法

- 影像與傅立葉轉換一對一對應
- 只要能取得傅氏轉換數據，就能由 **inverse FT** 計算到影像
- **CT** 投影與傅氏轉換的關係？

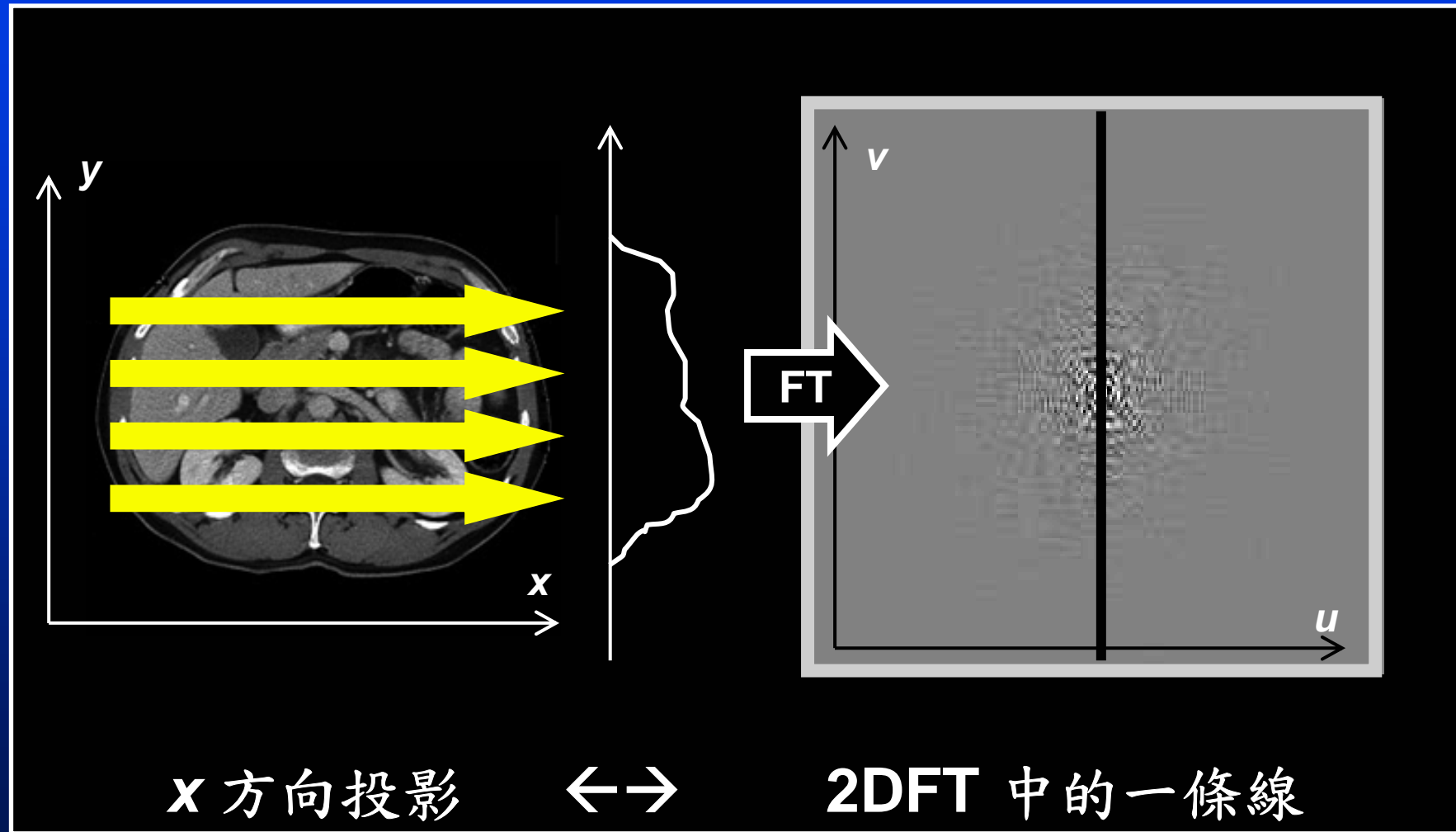
投影定理

- **Projection theorem**
 - 也稱為 **central slice theorem**
- 影像沿著某一方向的投影，經過 **1D FT** 之後，對應 **2D FT** 平面的一條線

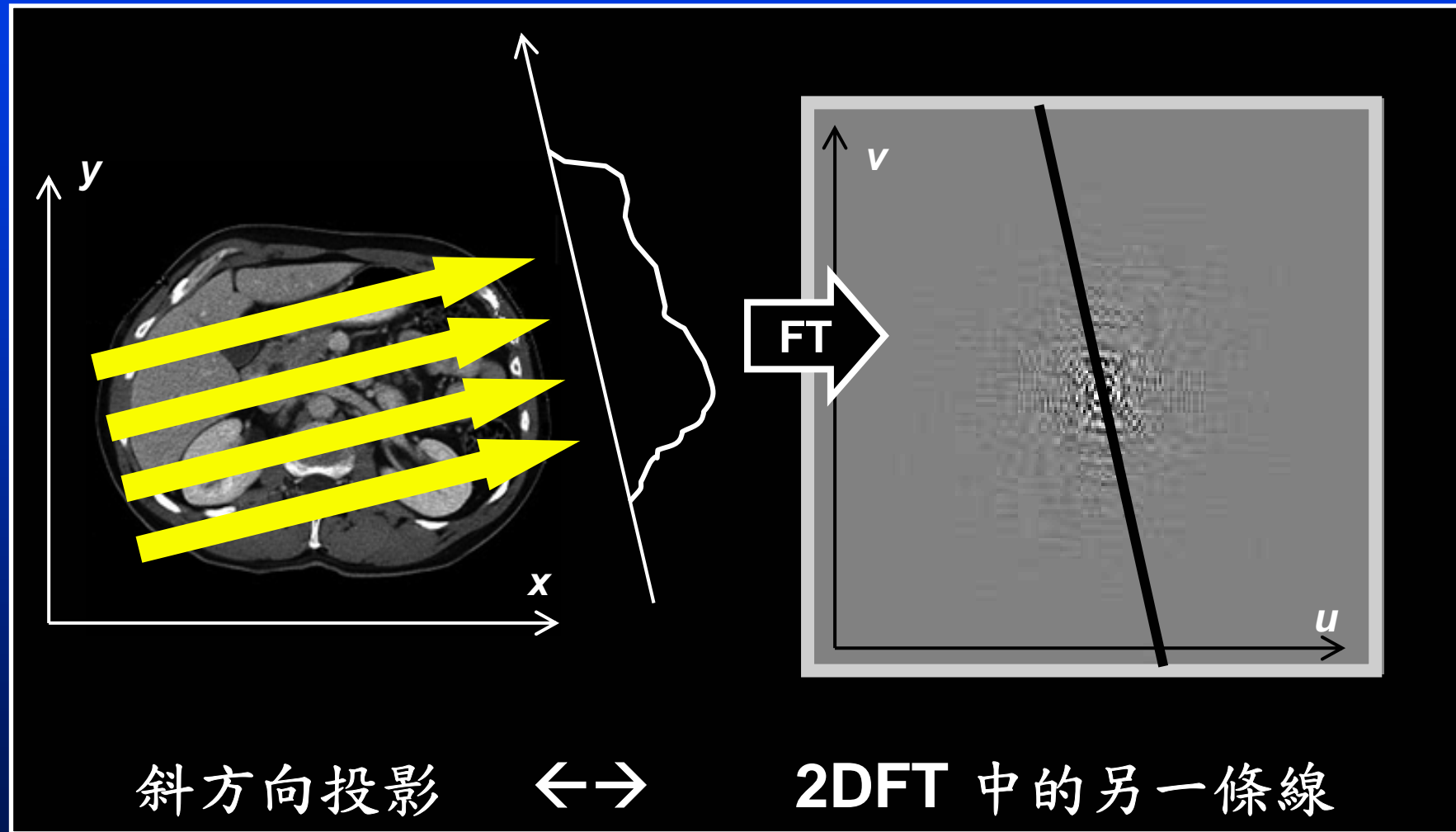
數學證明

- $F(u, v) = \iint f(x, y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy$
- $F(0, v) = \iint f(x, y) e^{-j2\pi vy} dx dy$
- $F(0, v) = \int f(x, y) dx e^{-j2\pi vy} dy$
- $F(0, v) = x$ 方向投影的 FT

Central Slice Theorem



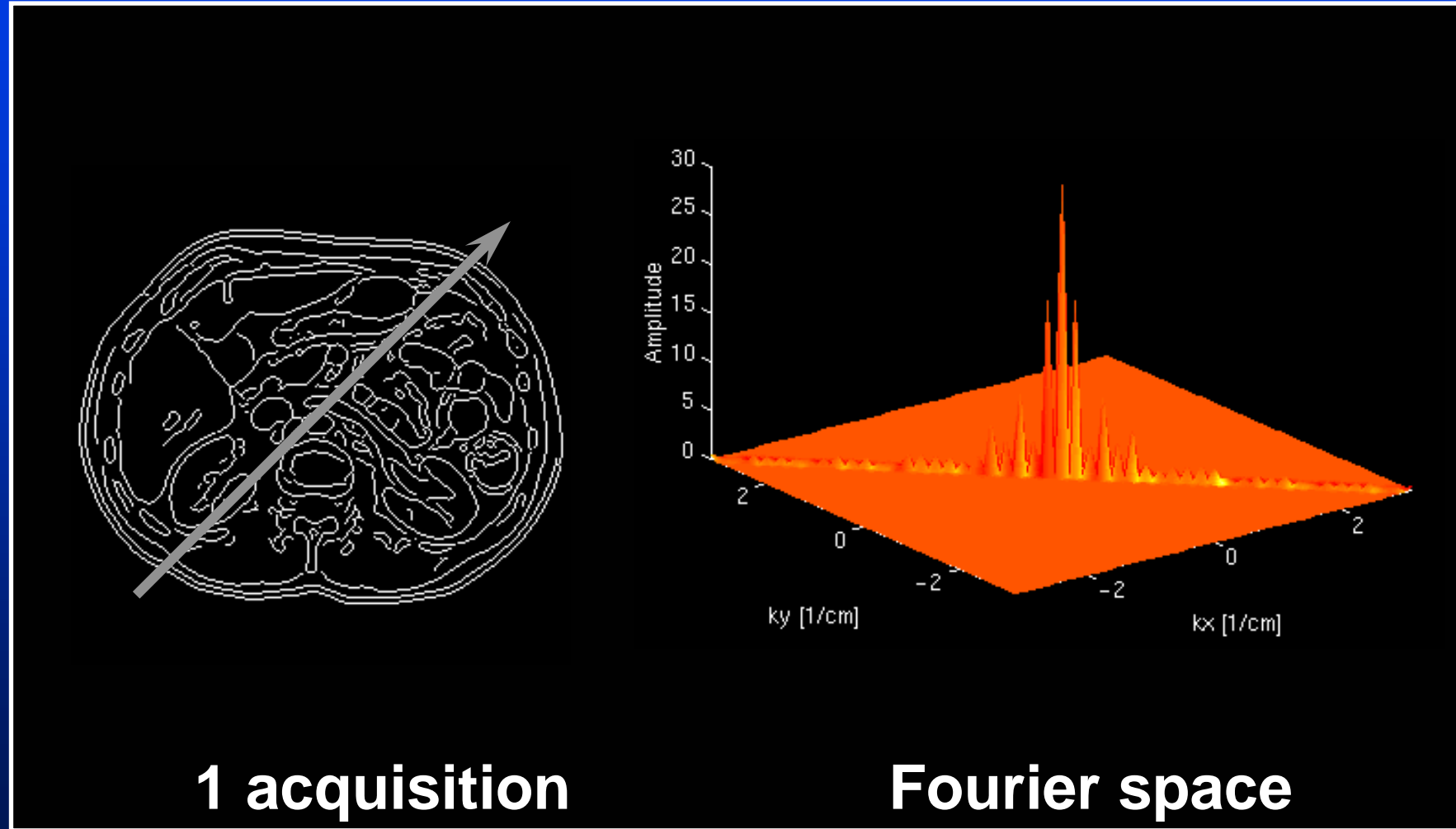
Central Slice Theorem



那就容易了啊

- CT 掃描過程 = 收集各角度投影
- 每一投影都計算 1D FT
- 彙整 = 極座標 2D FT 平面
- Inverse 2D FT 算回影像

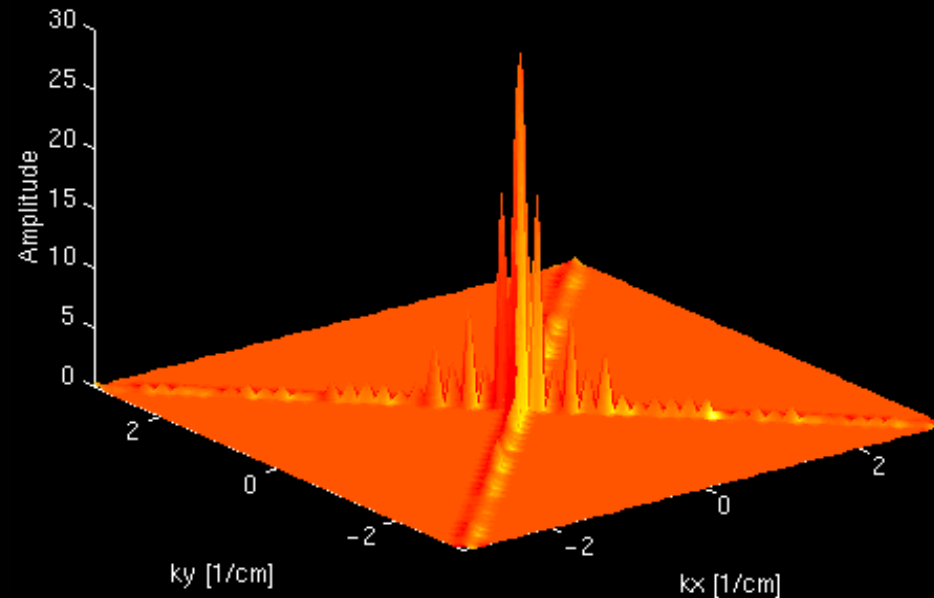
2D Fourier Transform 過程



2D Fourier Transform 過程

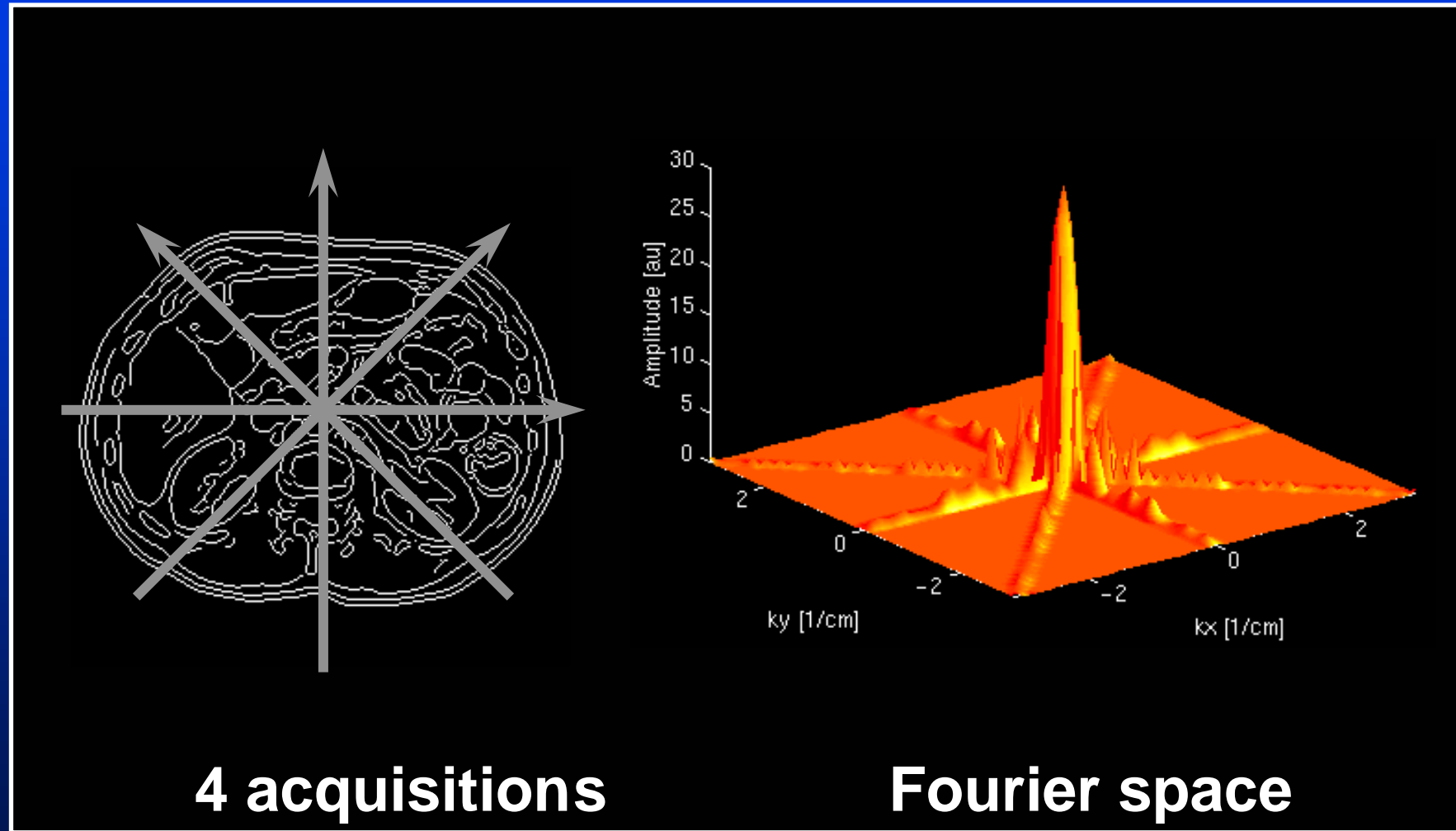


2 acquisitions

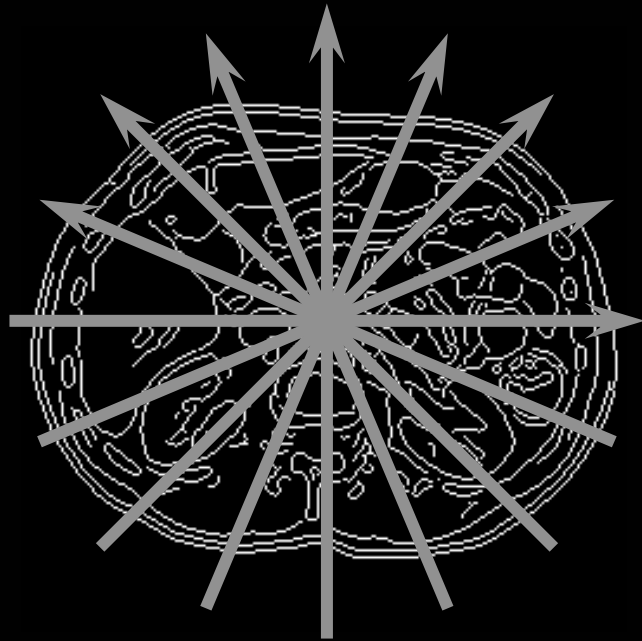


Fourier space

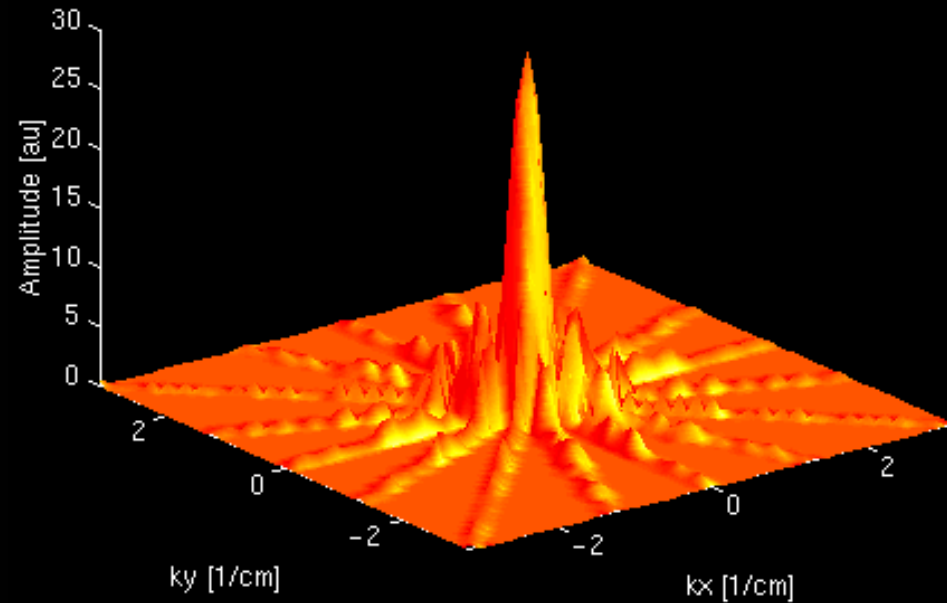
2D Fourier Transform 過程



2D Fourier Transform 過程



8 acquisitions



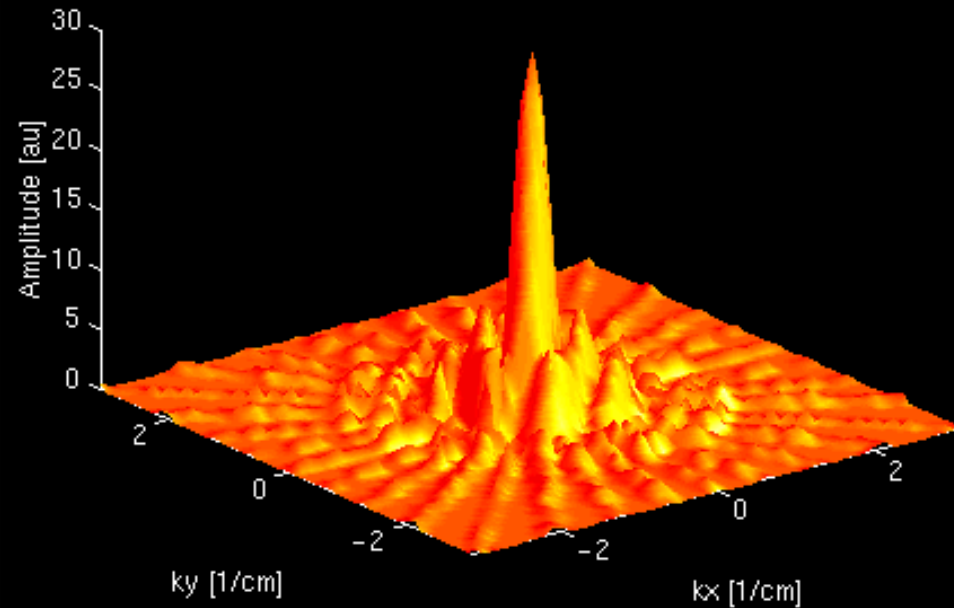
Fourier space

2D Fourier Transform 過程



畫不下了 ...

16 acquisitions



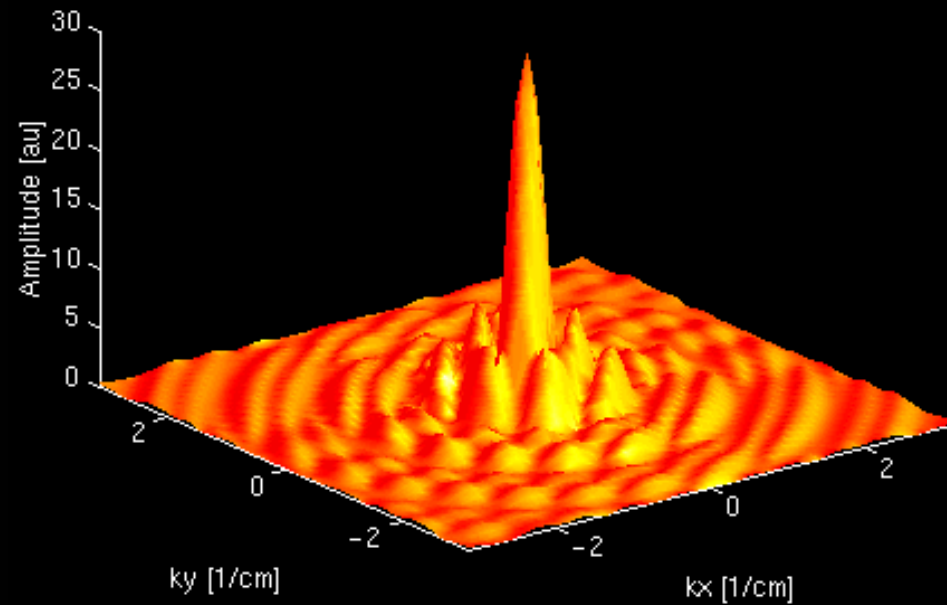
Fourier space

2D Fourier Transform 過程



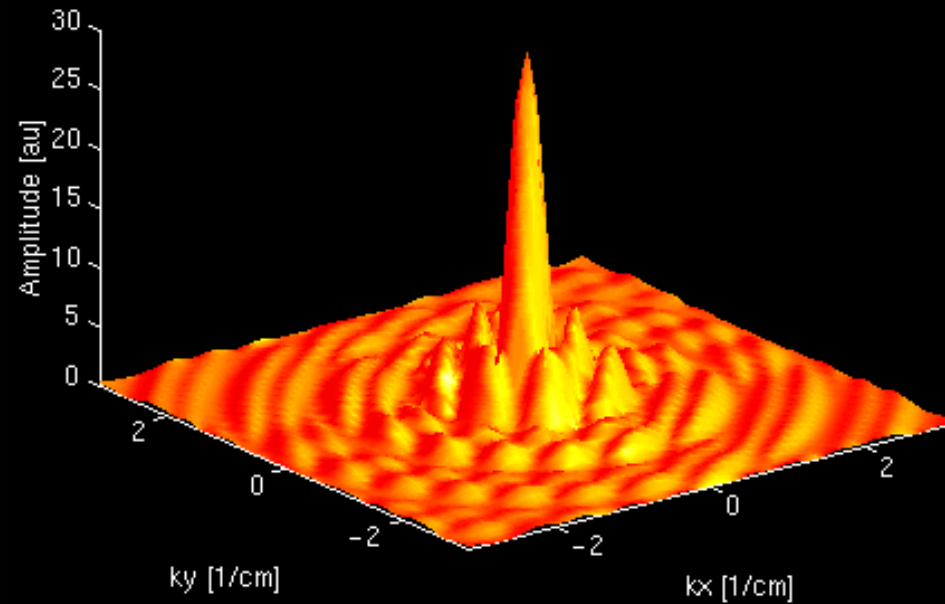
反正就是繞完了一圈

64 acquisitions



Fourier space

2D Fourier Transform 過程



計算回影像

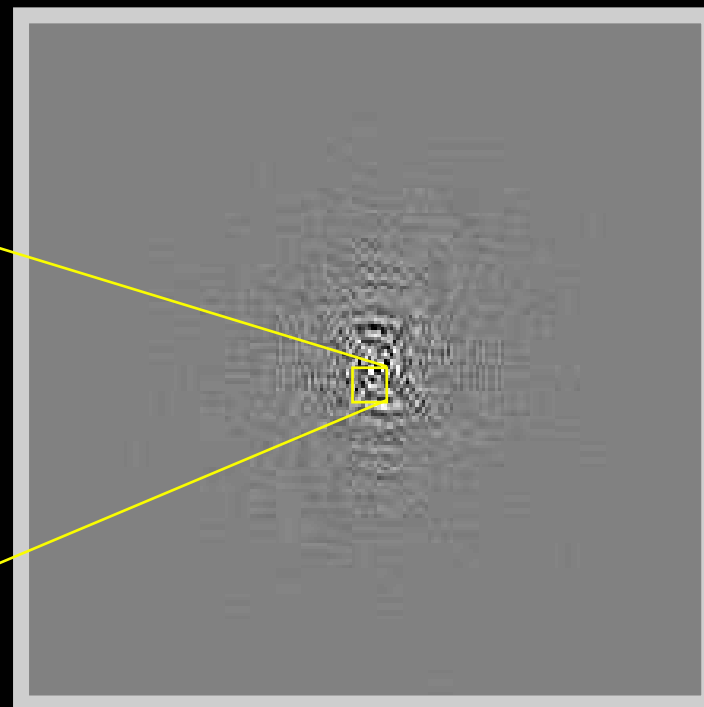
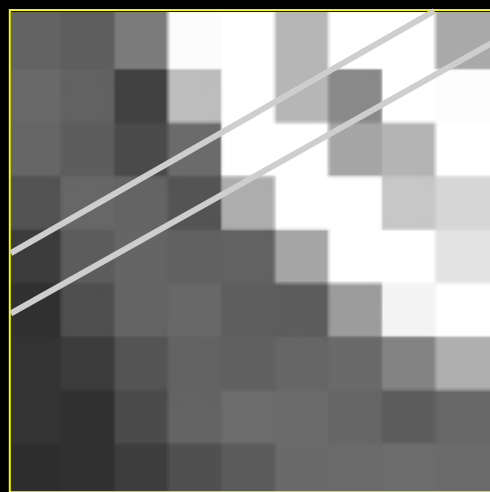


Fourier space

看似容易，其實不然

- 2D FT 在 Fourier space 中也是典型的 Cartesian 座標系統
 - 和影像一樣的規則格子點 (grid)
- 但是極座標投影是斜向 → re-grid

2D FT 法需先做 re-gridding



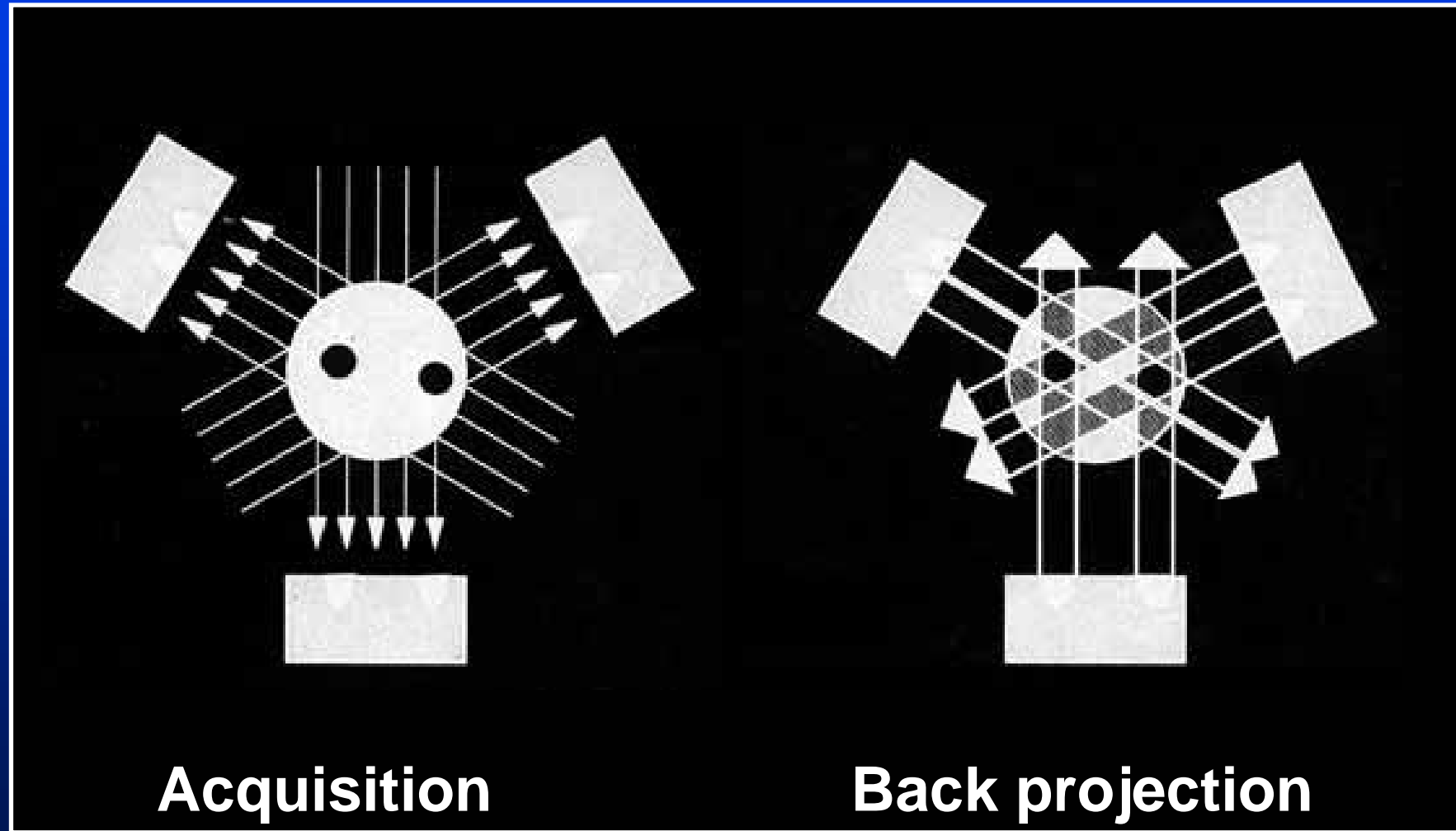
投射數據位置？

二維傅立葉轉換

如何重建影像？

- 解聯立方程式 (反矩陣)
- 疊代法 (仍有不同方法在研究中)
- 二維傅立葉轉換
- **(Filtered) back projection**

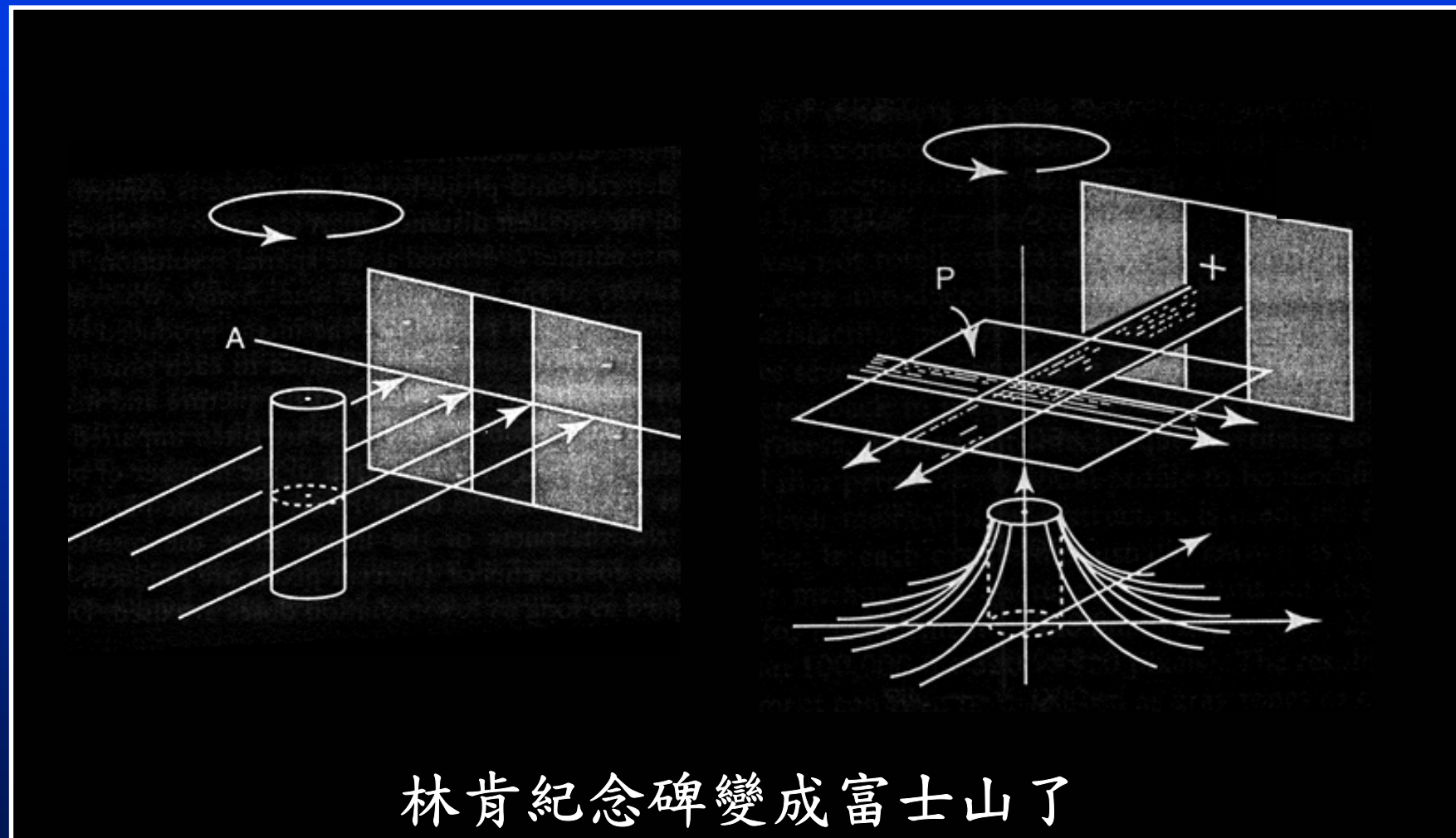
Back Projection 原理



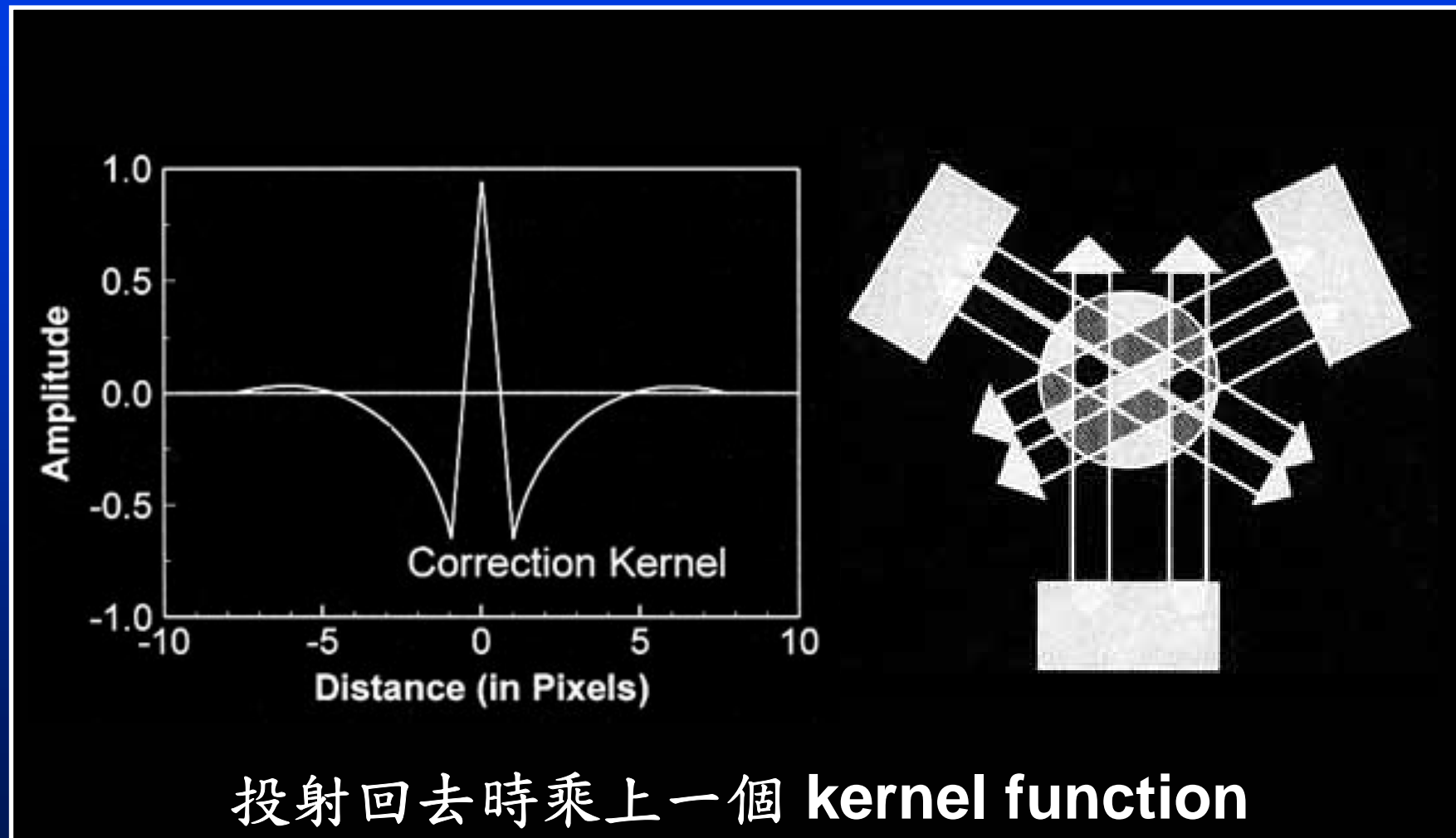
但有個問題

- 投射回去的投影線數據是有寬度的
 - 邊界周圍將模糊化
 - **Point spread function blurring**
- 投射前需先做濾波

Back Projection 造成的模糊現象



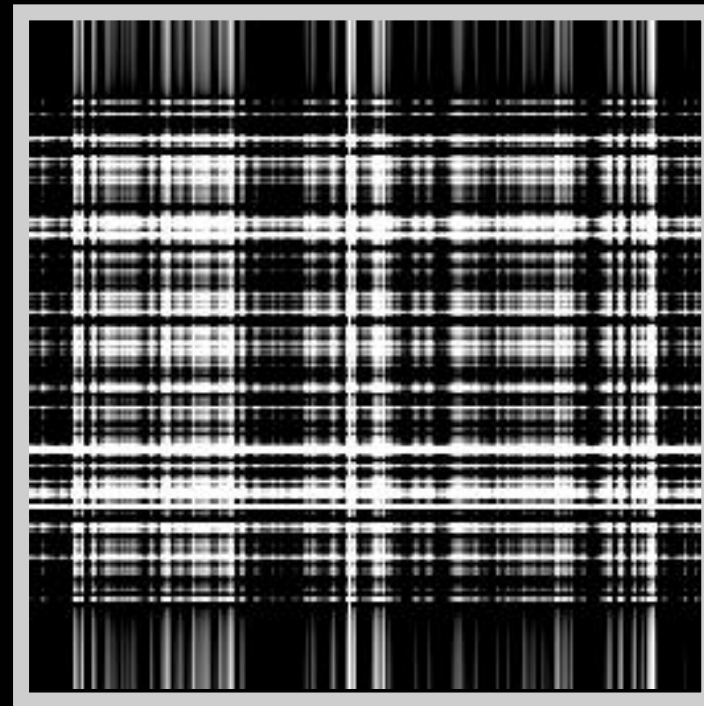
Filtered Back Projection



Filtered Back Projection 的過程



原始物體

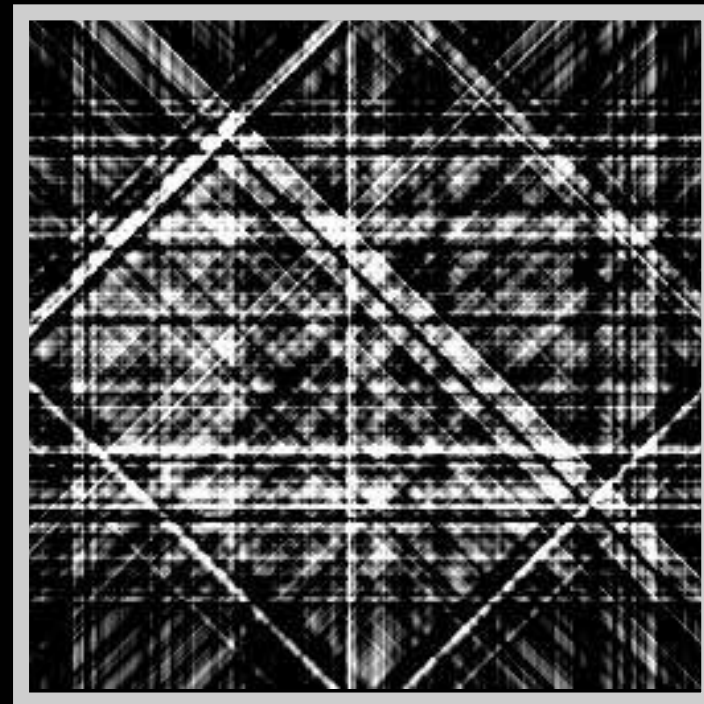


2 個投影角度

Filtered Back Projection 的過程



原始物體

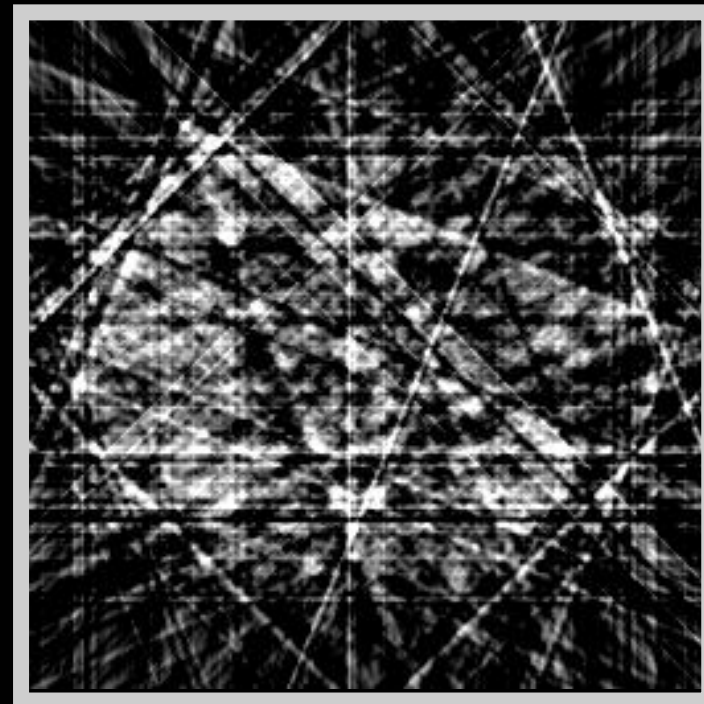


4 個投影角度

Filtered Back Projection 的過程



原始物體

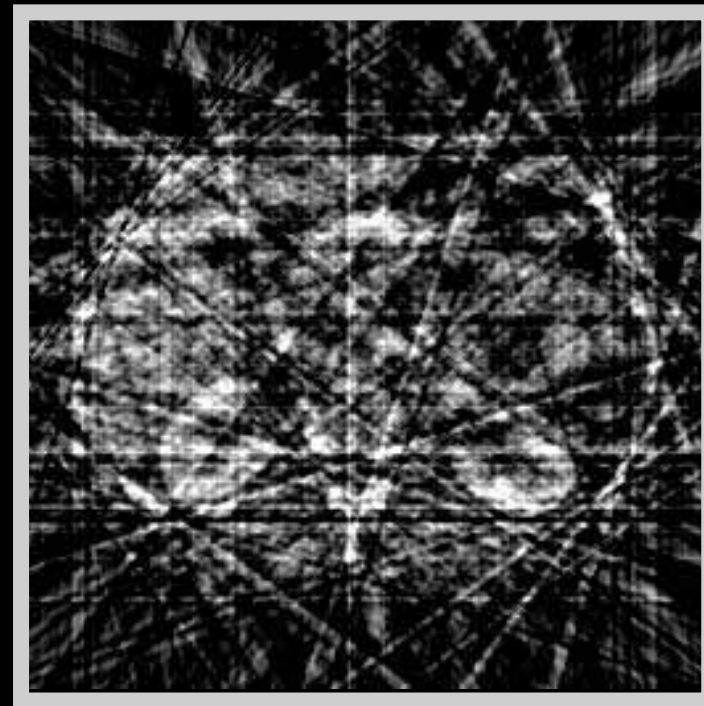


8 個投影角度

Filtered Back Projection 的過程



原始物體

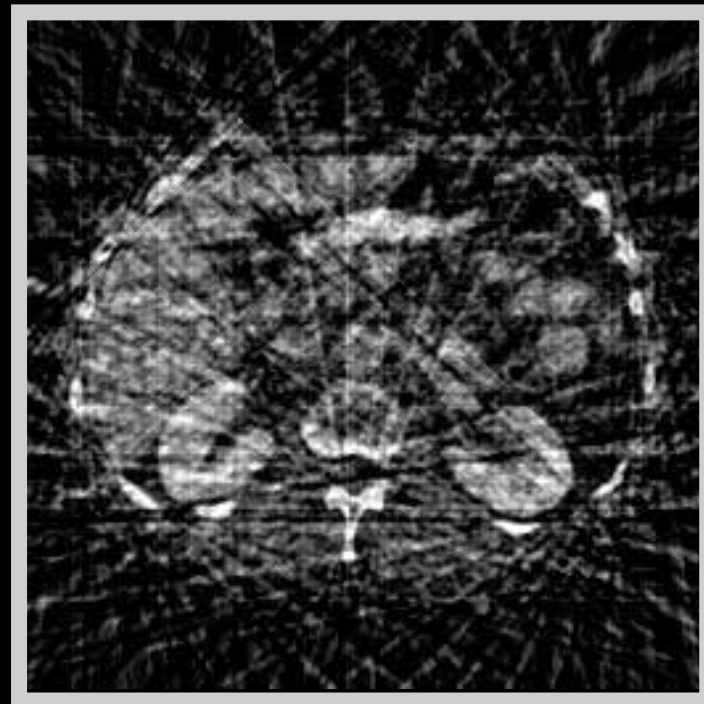


10 個投影角度

Filtered Back Projection 的過程



原始物體

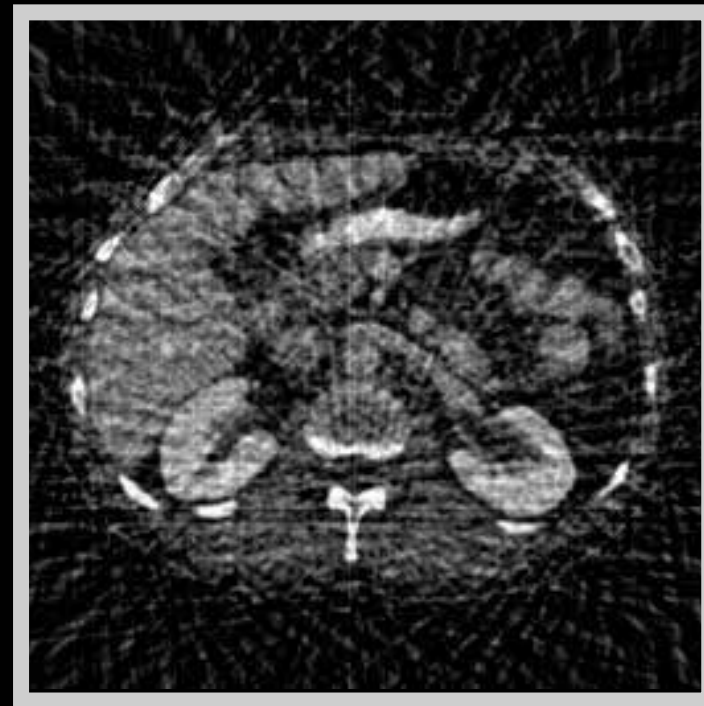


20 個投影角度

Filtered Back Projection 的過程



原始物體



30 個投影角度

Filtered Back Projection 的過程



原始物體

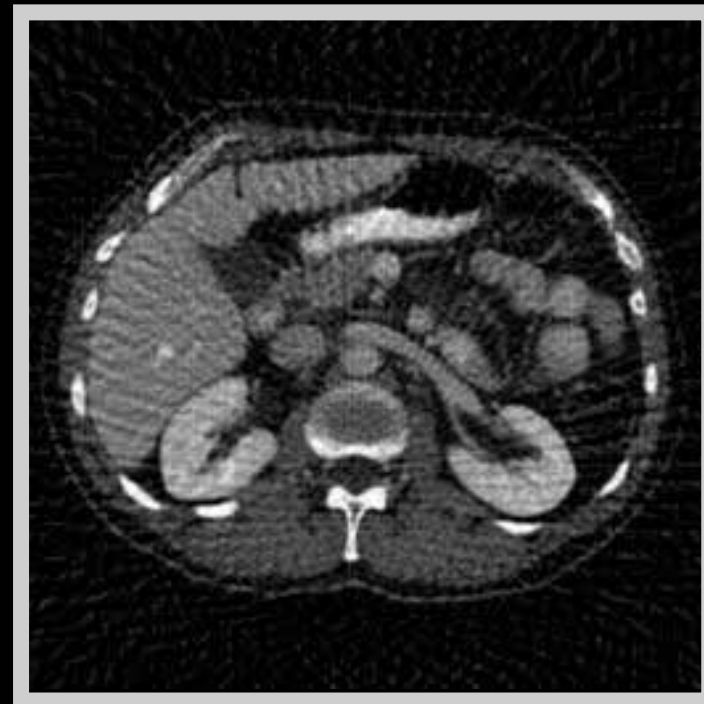


45 個投影角度

Filtered Back Projection 的過程



原始物體



60 個投影角度

Filtered Back Projection 的過程



原始物體

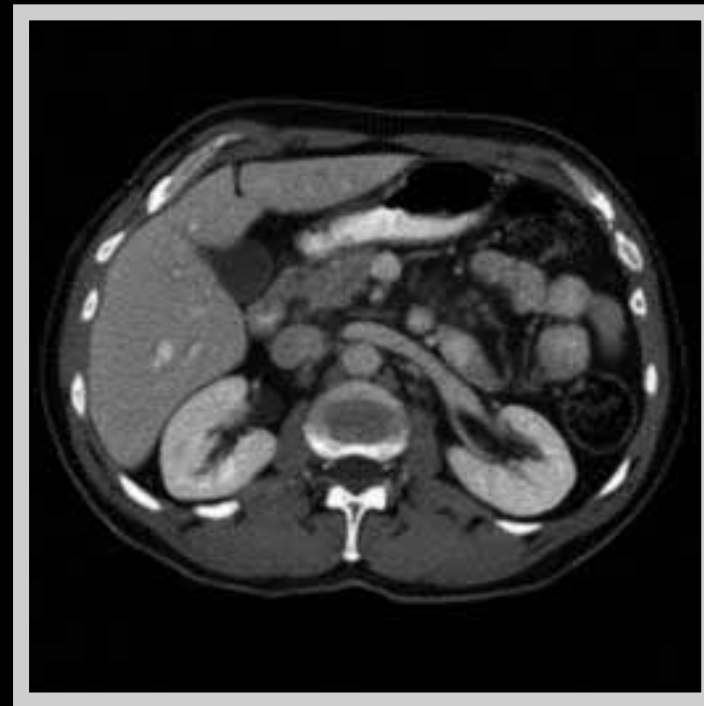


90 個投影角度

Filtered Back Projection 的過程



原始物體



180 個投影角度

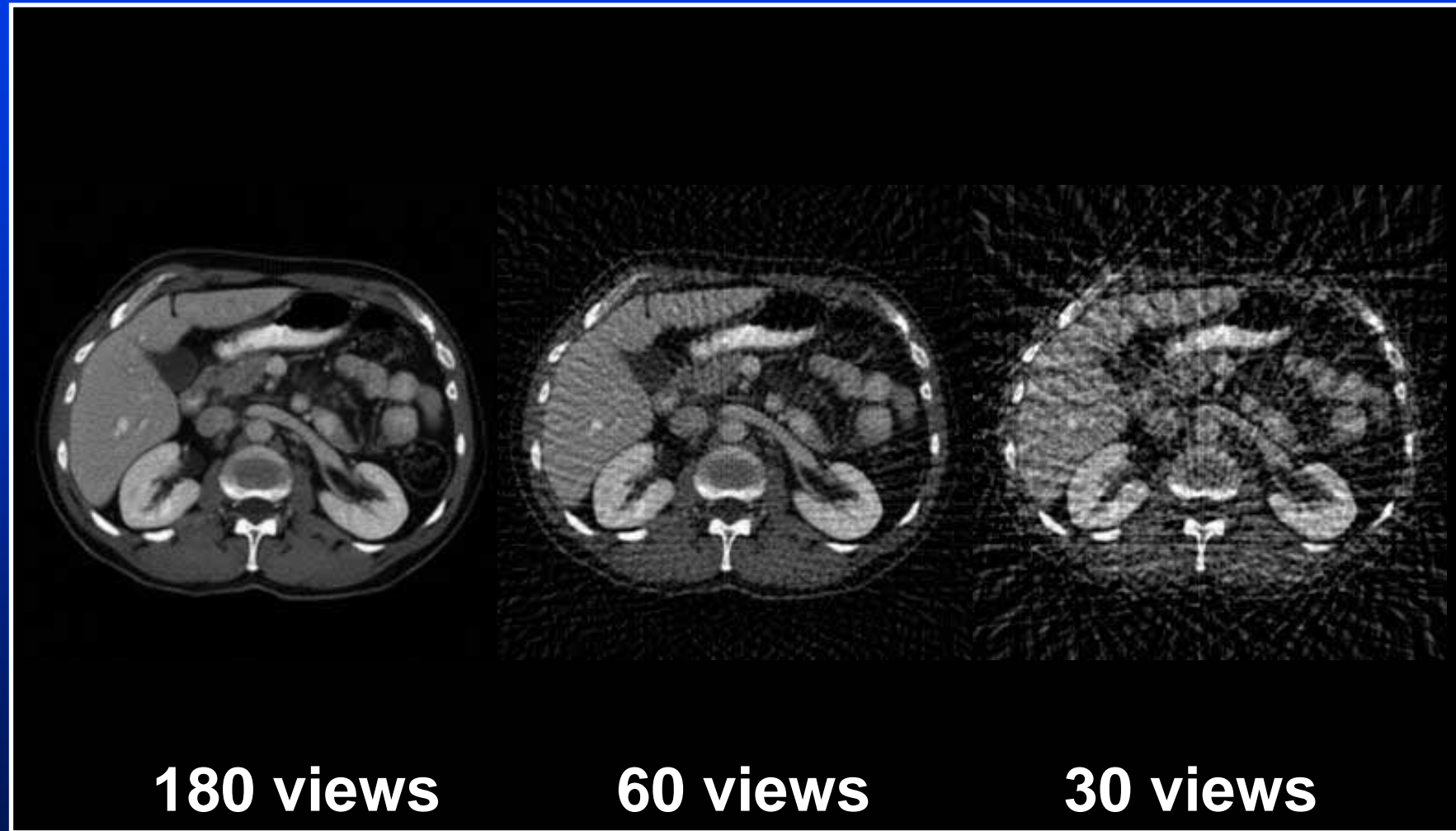
數據點的多寡

- 原始發明 (1972)
 - 160 rays, 180 views = 28,800 點
 - 5.7/pixel @ 80x80 matrix
- “Over-determined” system

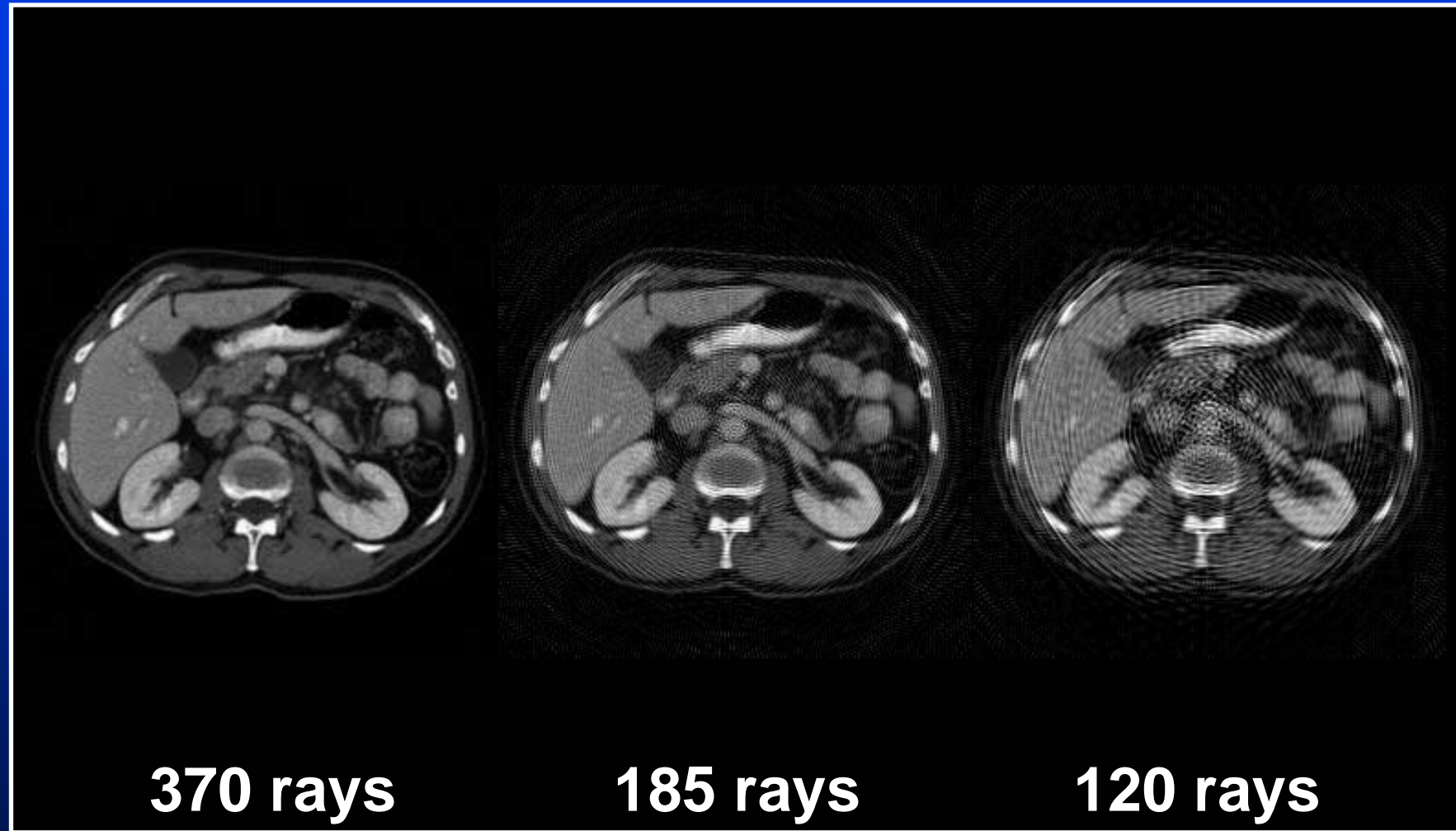
現在的數據點

- 750 rays, 600 views = 450,000 點
- 2.8/pixel @ 512x512 matrix
- 影像解析度更加提高
- 重建計算的假影也愈趨減少

數據多寡對 CT 影像的影響 (370 rays)



數據多寡對 CT 影像的影響 (180 views)



Modern State-of-the-art

- **Filtered back projection** 已商品化
- 其他方式仍有研發，差異有限
- 但醫學診斷並不仰賴微小差異
- 影像重建仍有人在研究，但非瓶頸

三維影像顯示

3D Render & Display

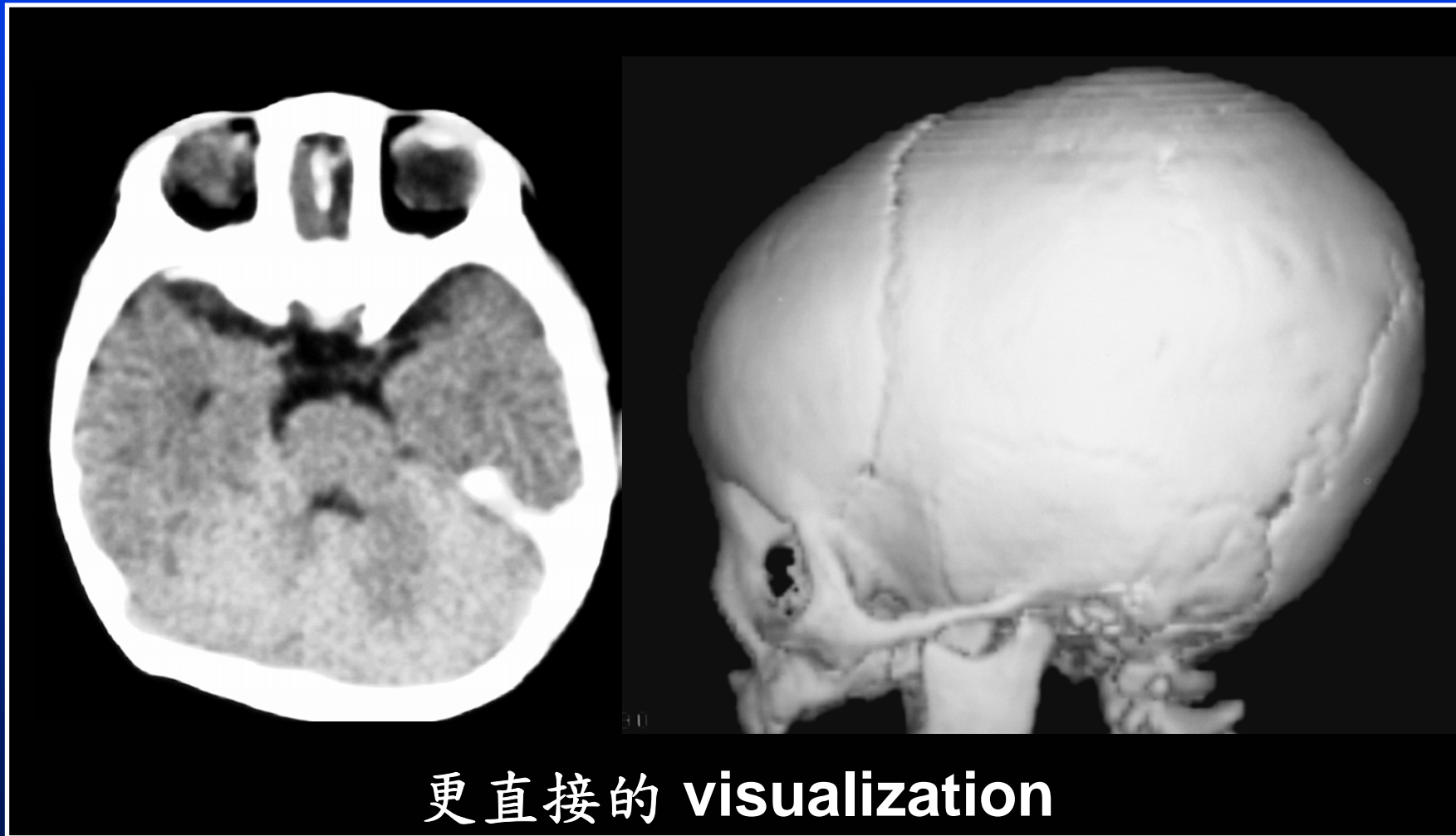
鍾孝文 教授

台大電機系 三軍總醫院放射線部

三維影像顯示

- 由三維數據顯示成立體影像
- 選擇呈現器官組織，輔助視覺效果
- 協助手術或放射治療計畫
- 不過實在沒時間仔細教了 ...

基本上就是從 2D 到 3D

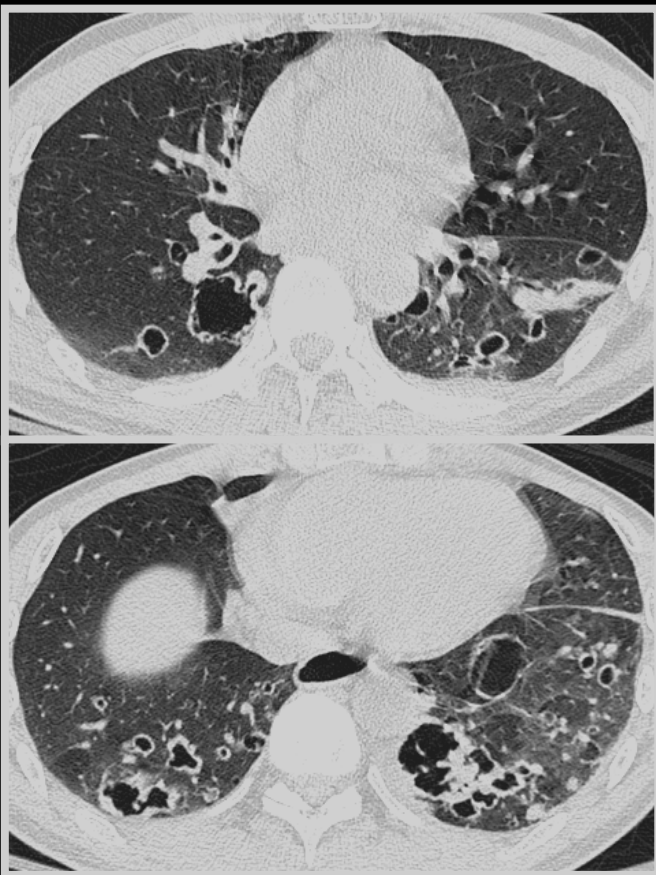


更直接的 visualization

很快帶過一些 ...

- **Multi-planar reformatting**
- **Maximum intensity projection**
- **Volume/surface rendering**
- **Coordinate transformation ...**

上次 Show 過的 CT ...



Original axial images

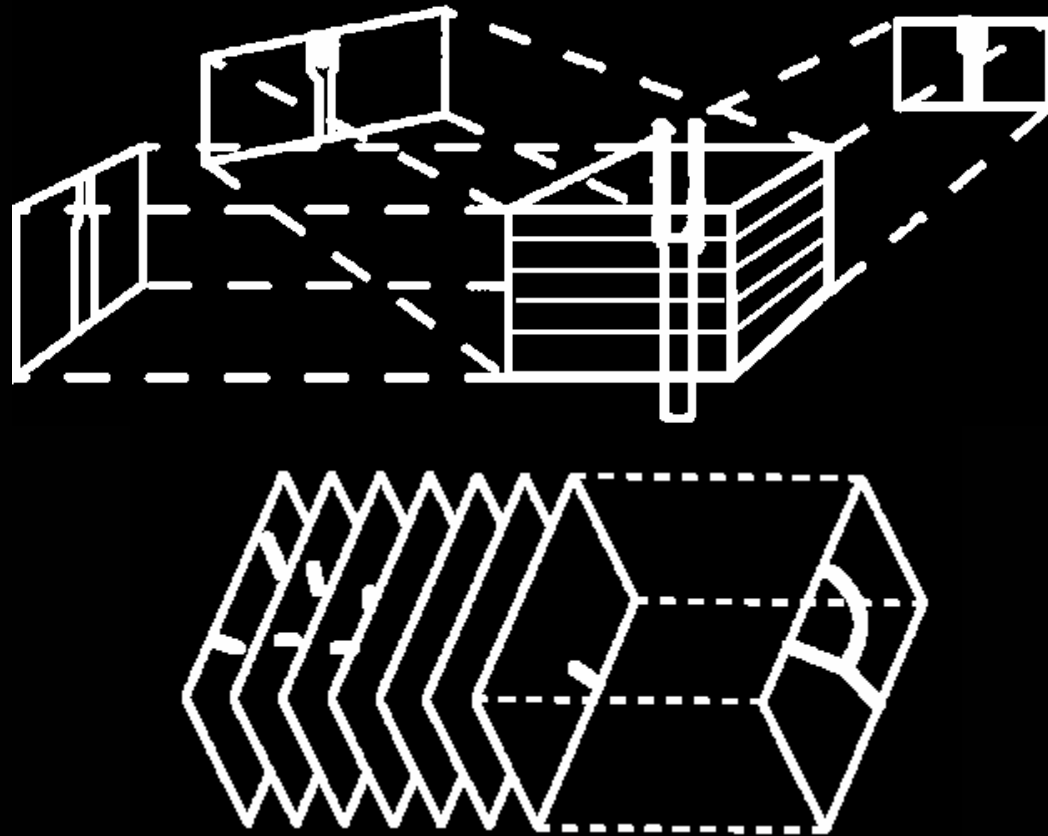


Coronal reformatting

最大亮度投影

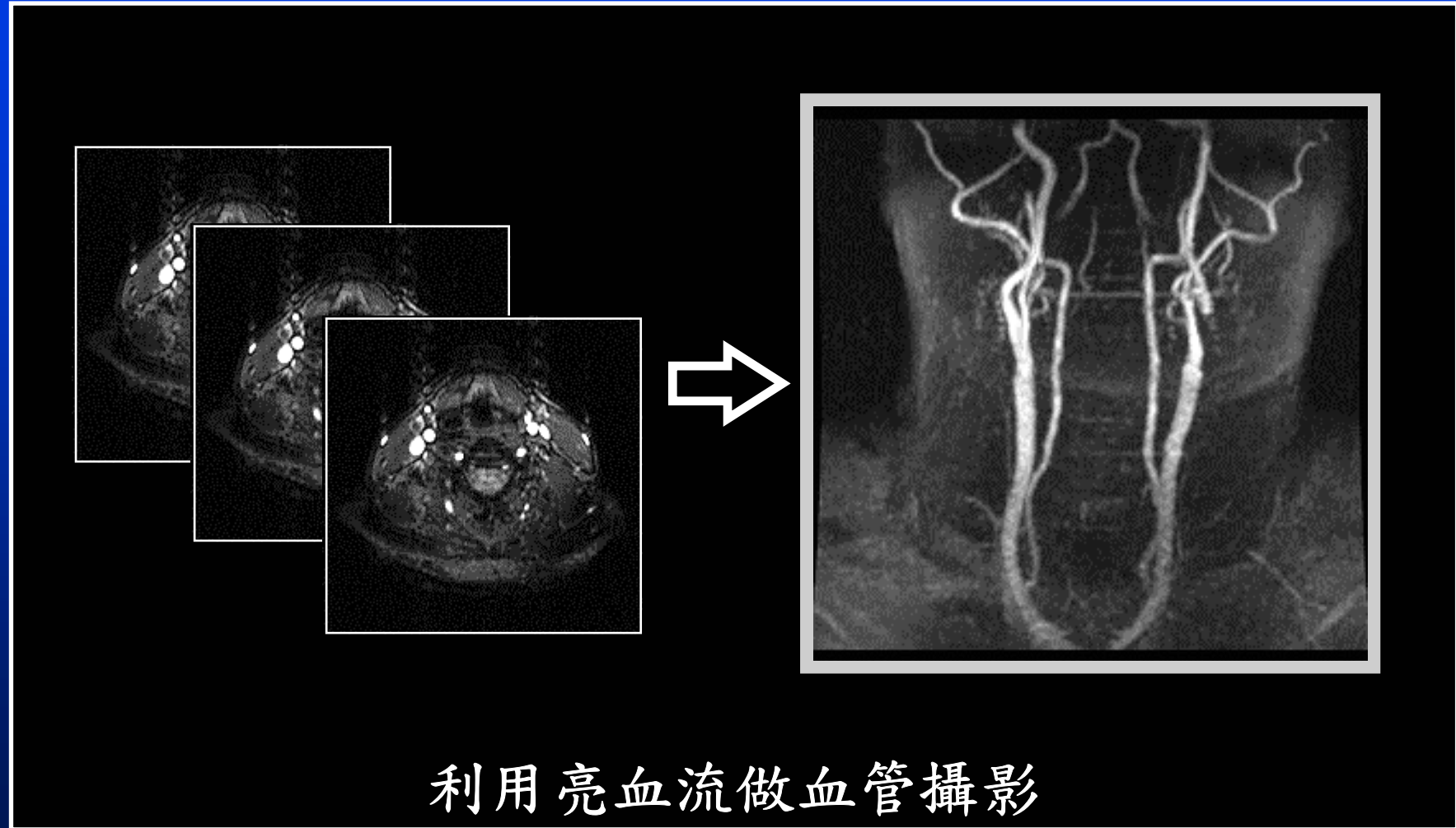
- **Maximum intensity projection**
- 凸顯高亮度組織 (例如顯影劑)
- 常用於 **CT** 或 **MRI** 的血管攝影
- 但缺乏 **depth information**

Maximum Intensity Projection 原理

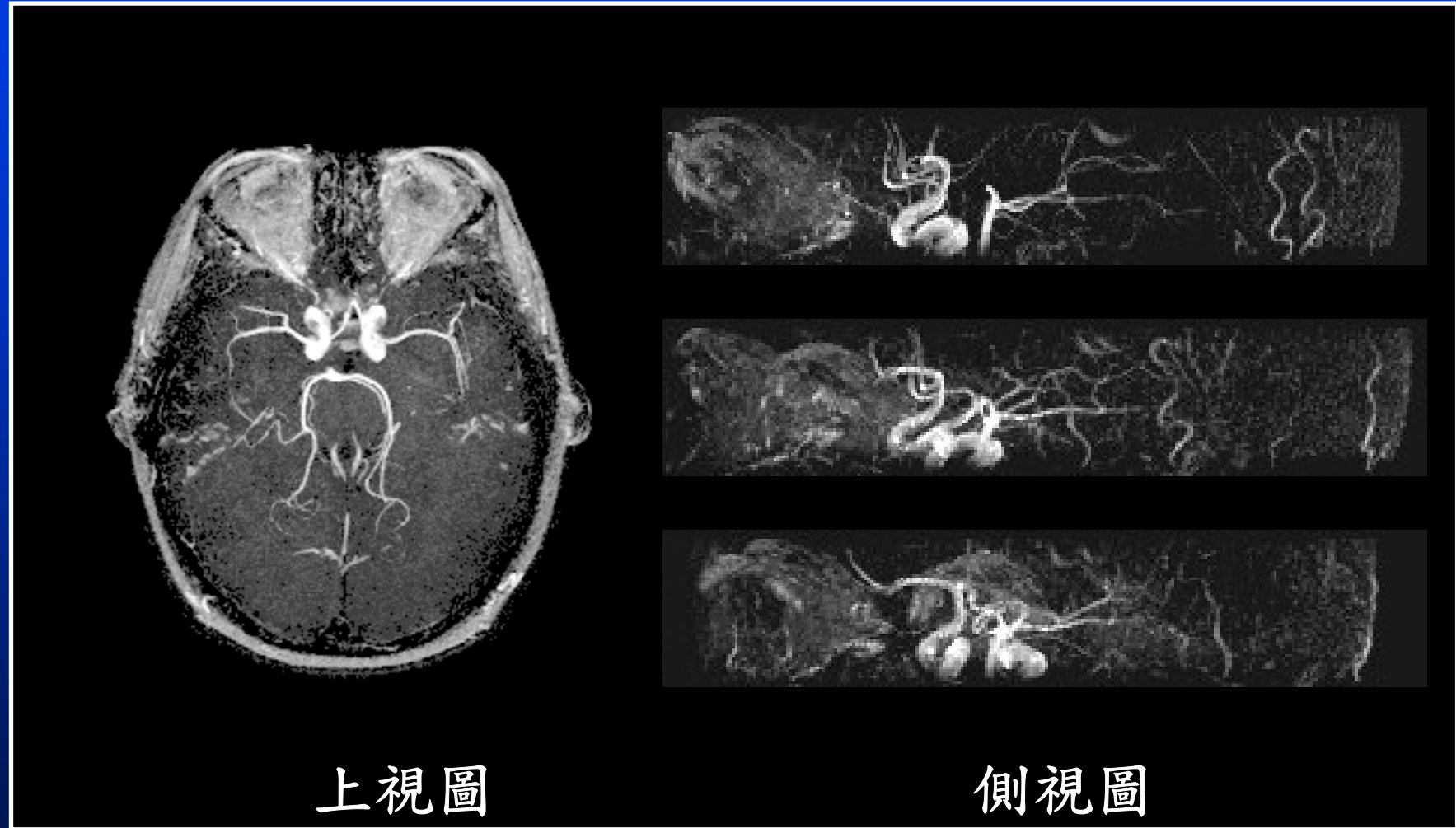


任何角度皆可做投影，只需要計算直線座標

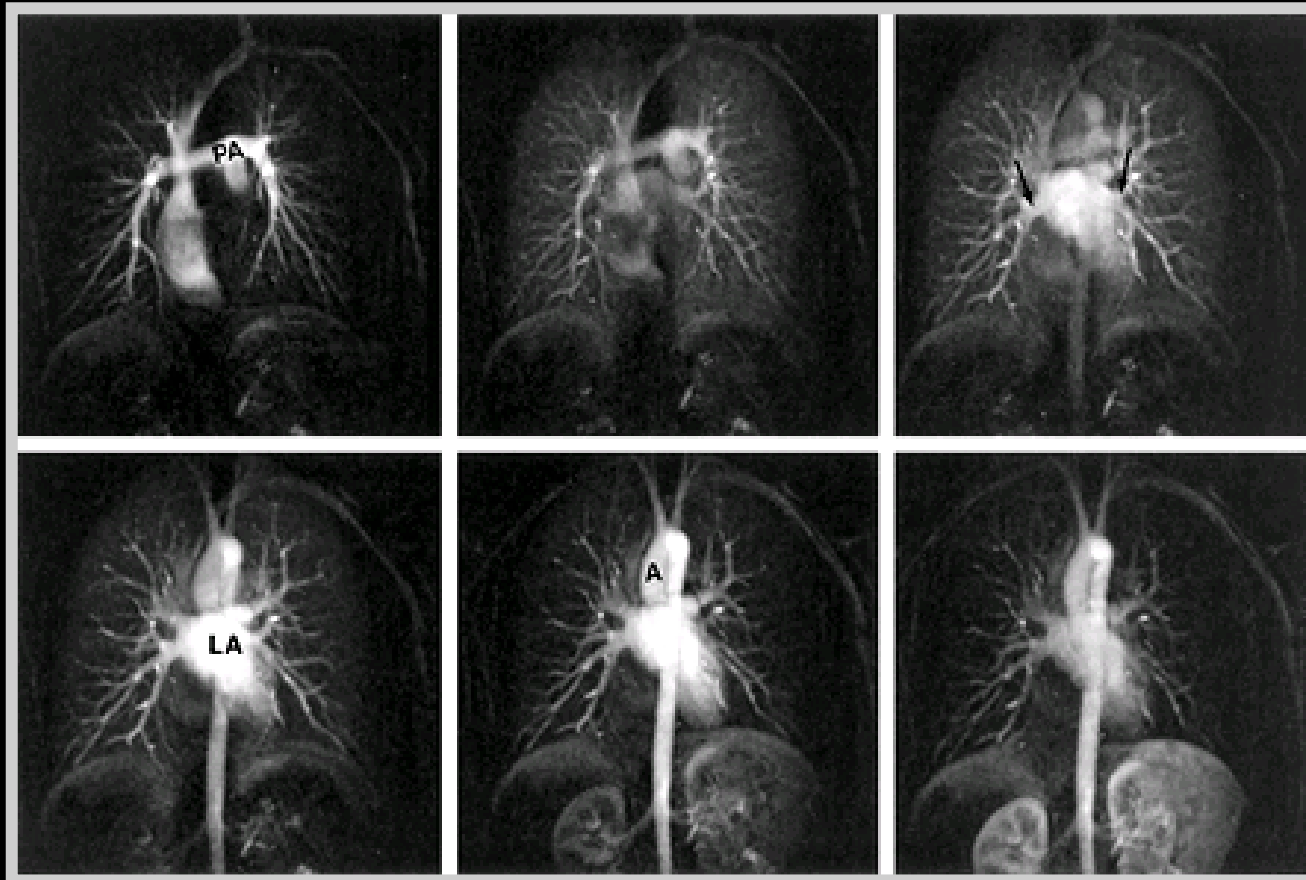
Time-of-Flight MR Angiogram



顱內的 MRI 血管攝影



顯影劑動態的 MRI 血管攝影

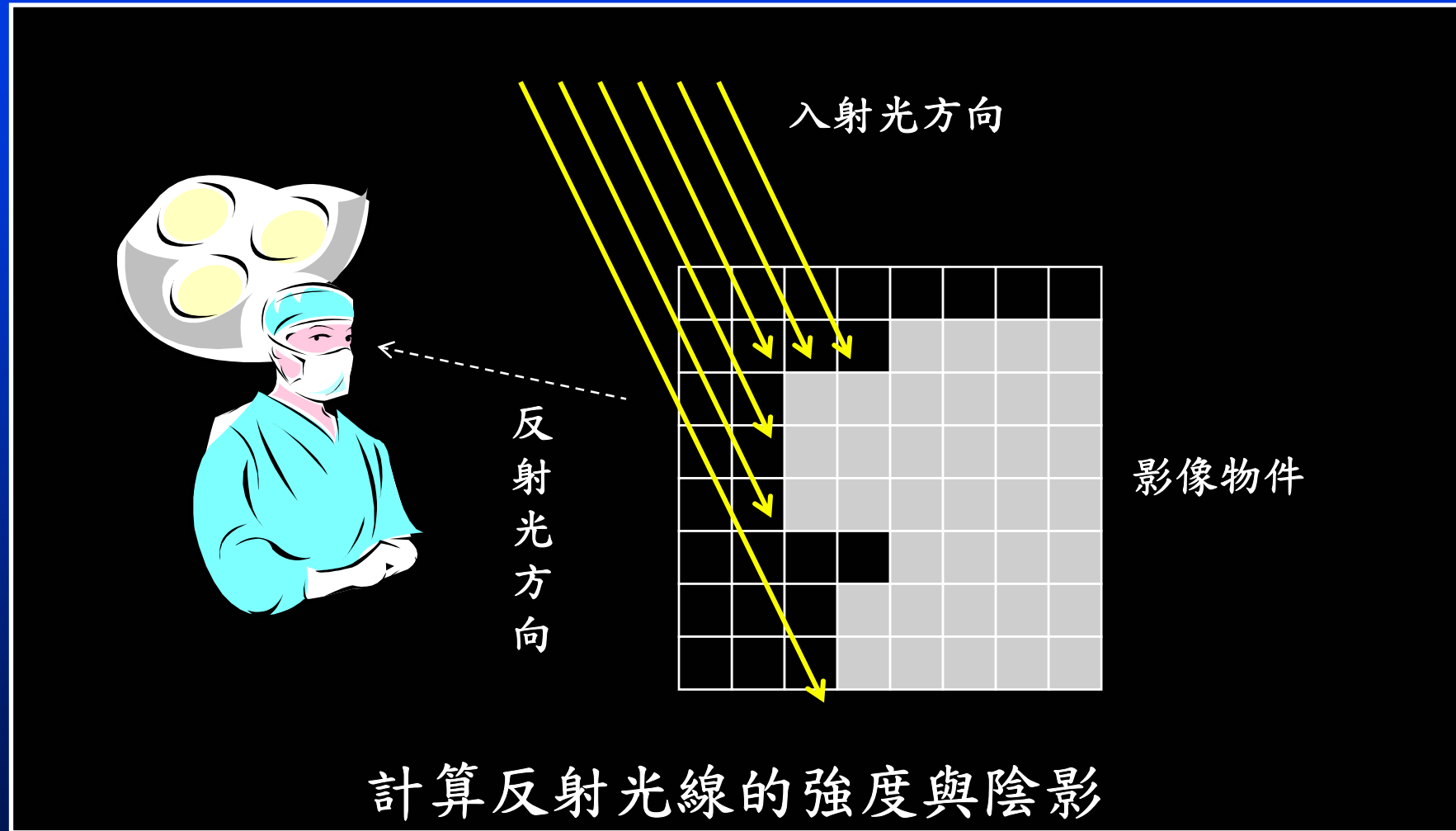


正常受試者胸腔血管

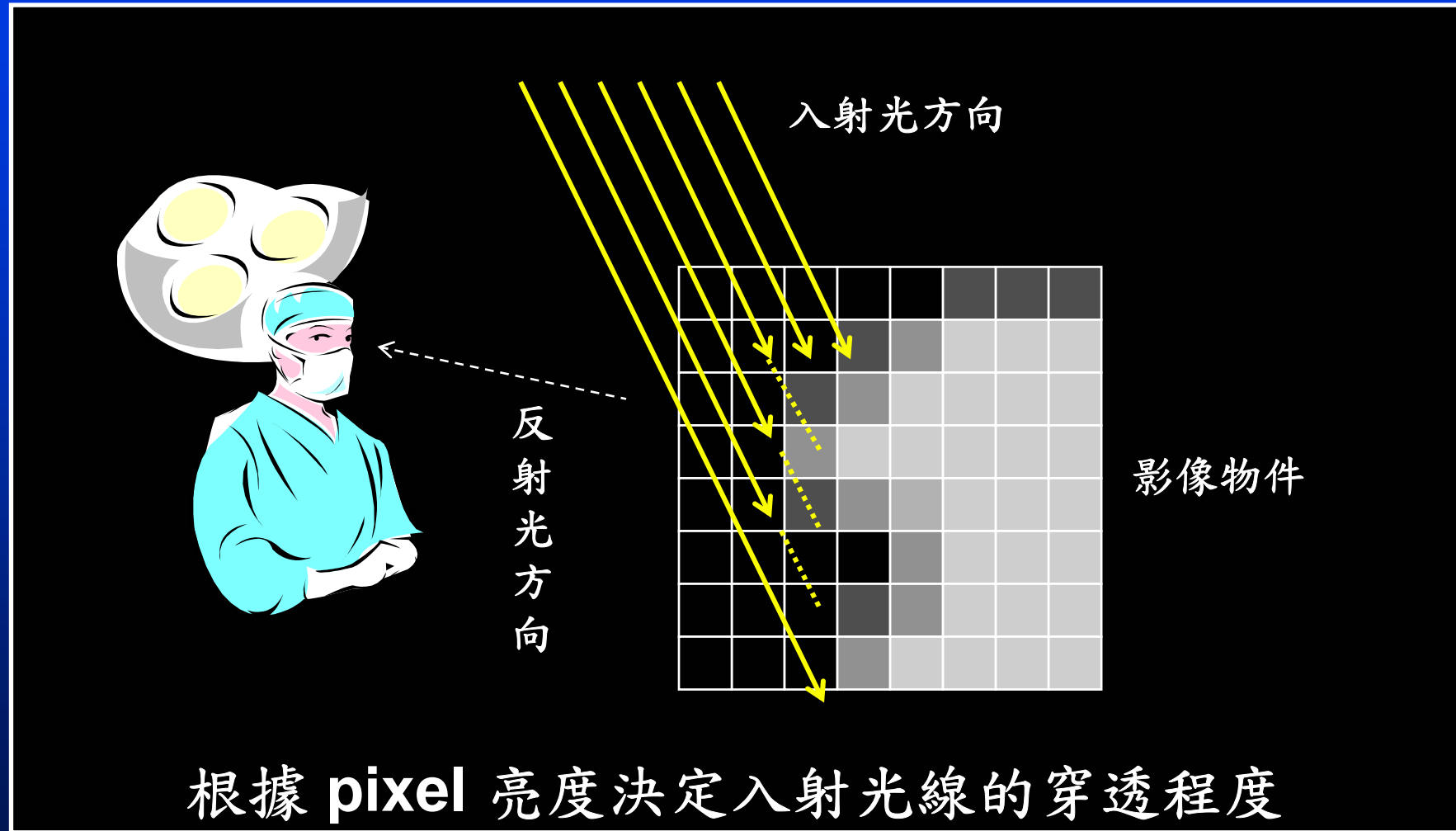
3D Rendering

- 決定物體邊緣位在何處
 - Volume vs. surface rendering
- 顯示：Shaded surface display
 - 打光的方法

Volume Rendering 原理 (Ray Tracing)



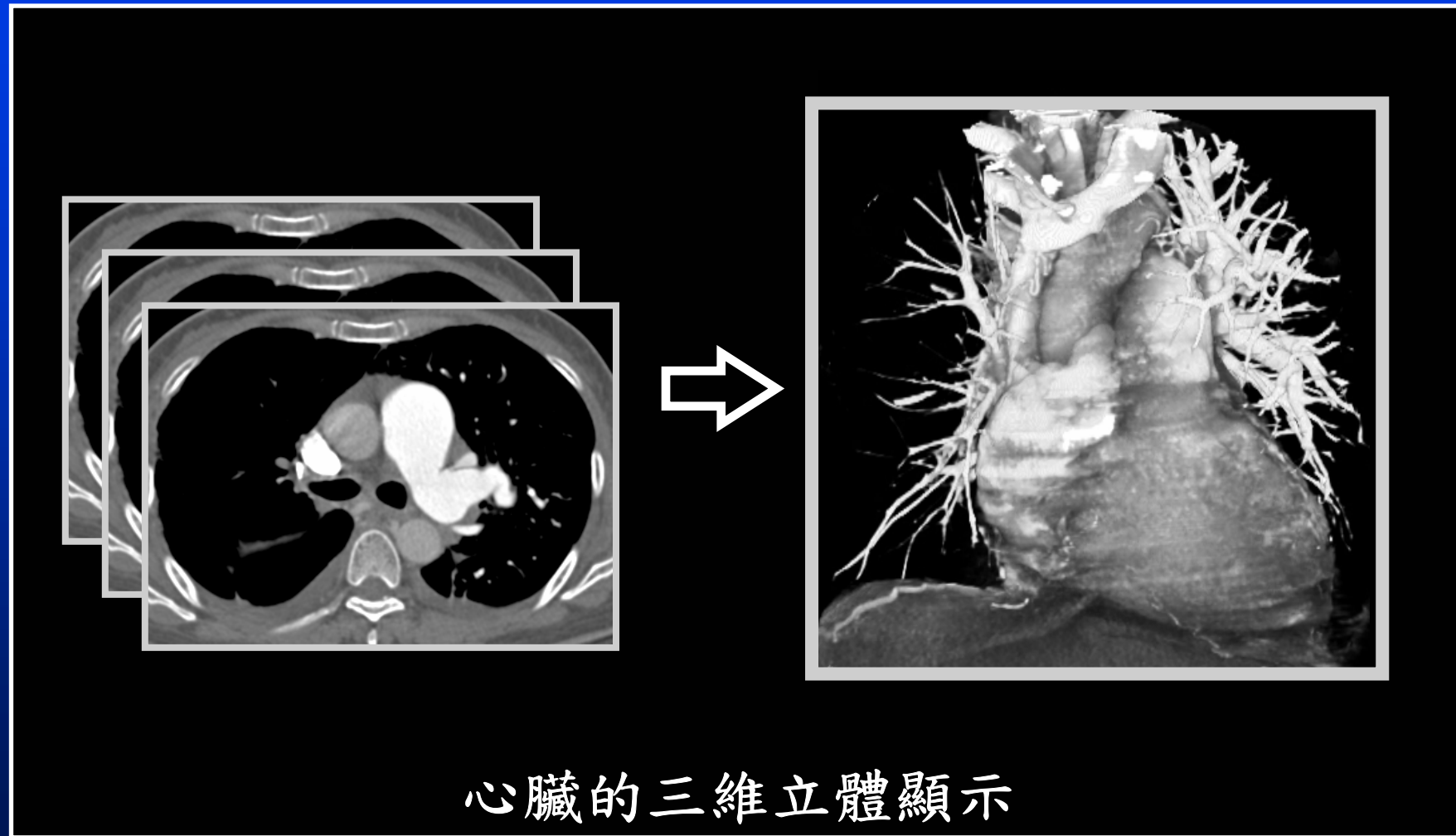
影像物件難以明確定義時



三維重建

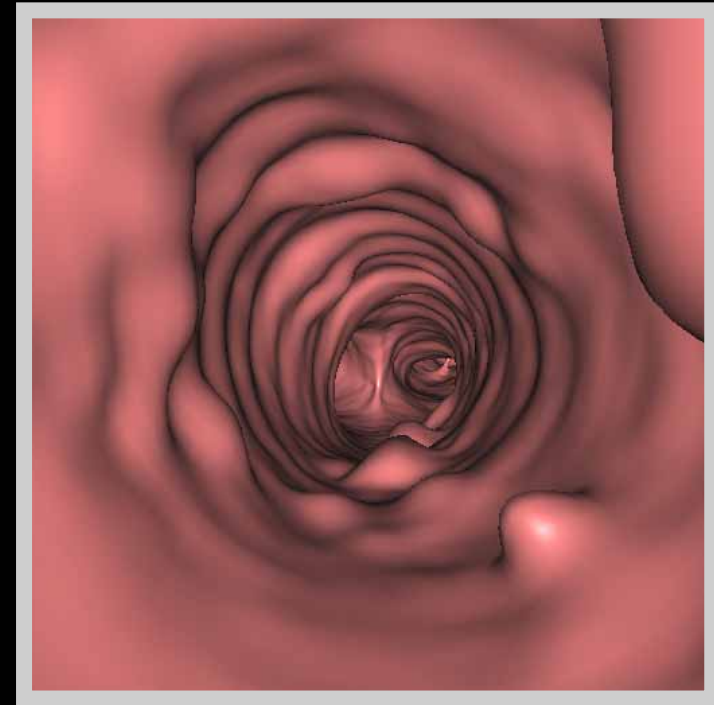
- **Volume rendering (侷限於解析度)**
 - Ray tracing algorithm
- **Surface rendering (通常較細緻)**
 - Marching cube algorithm

不過打光的方式是差不多一樣 (CT)



心臟的三維立體顯示

也可以更誇張些 (CT)

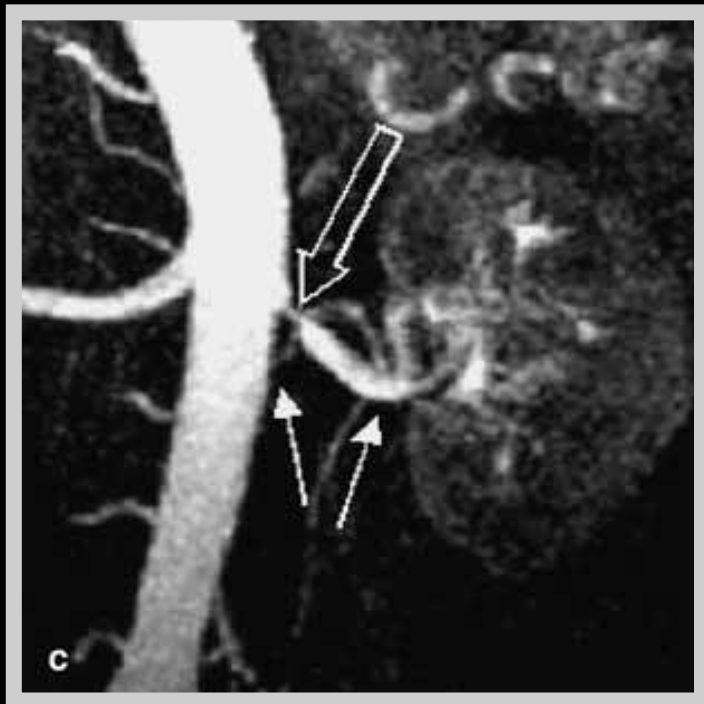


Virtual Endoscope (你可以再近一點)

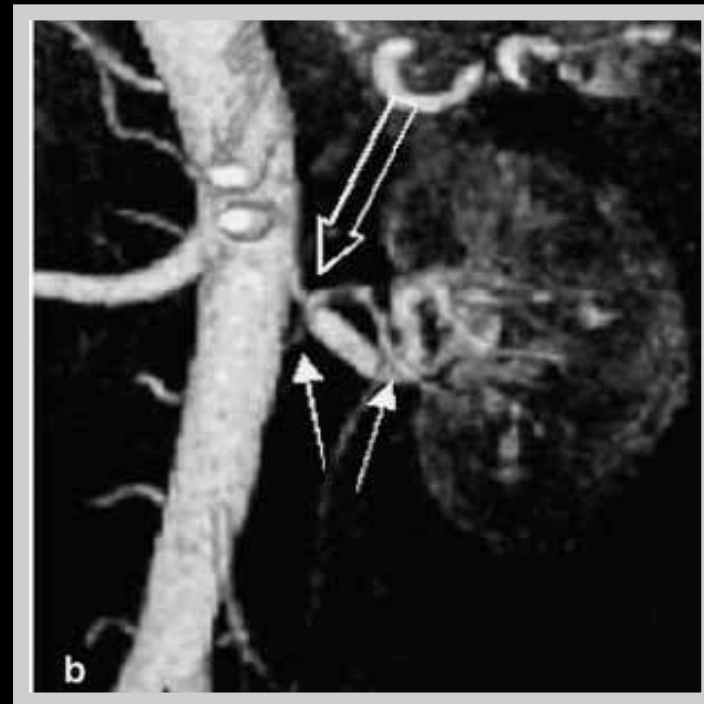
用血管攝影做簡單比較

- 原始數據：CE MRI angiography
 - from renal arteries
- Maximum intensity projection
- Surface rendering

Depth 的重要性 (Renal Arteries)



Max intensity proj

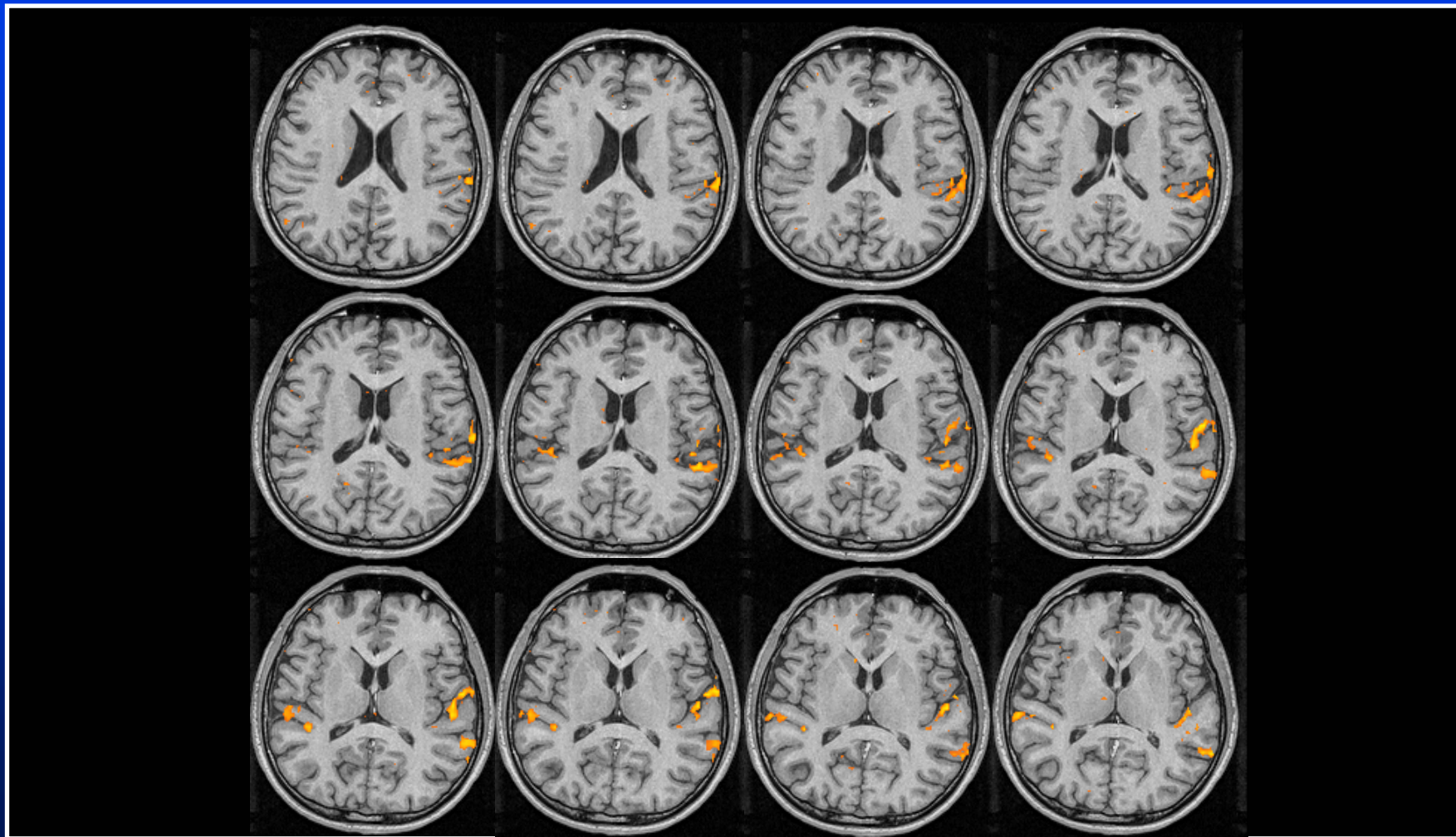


Surface rendering

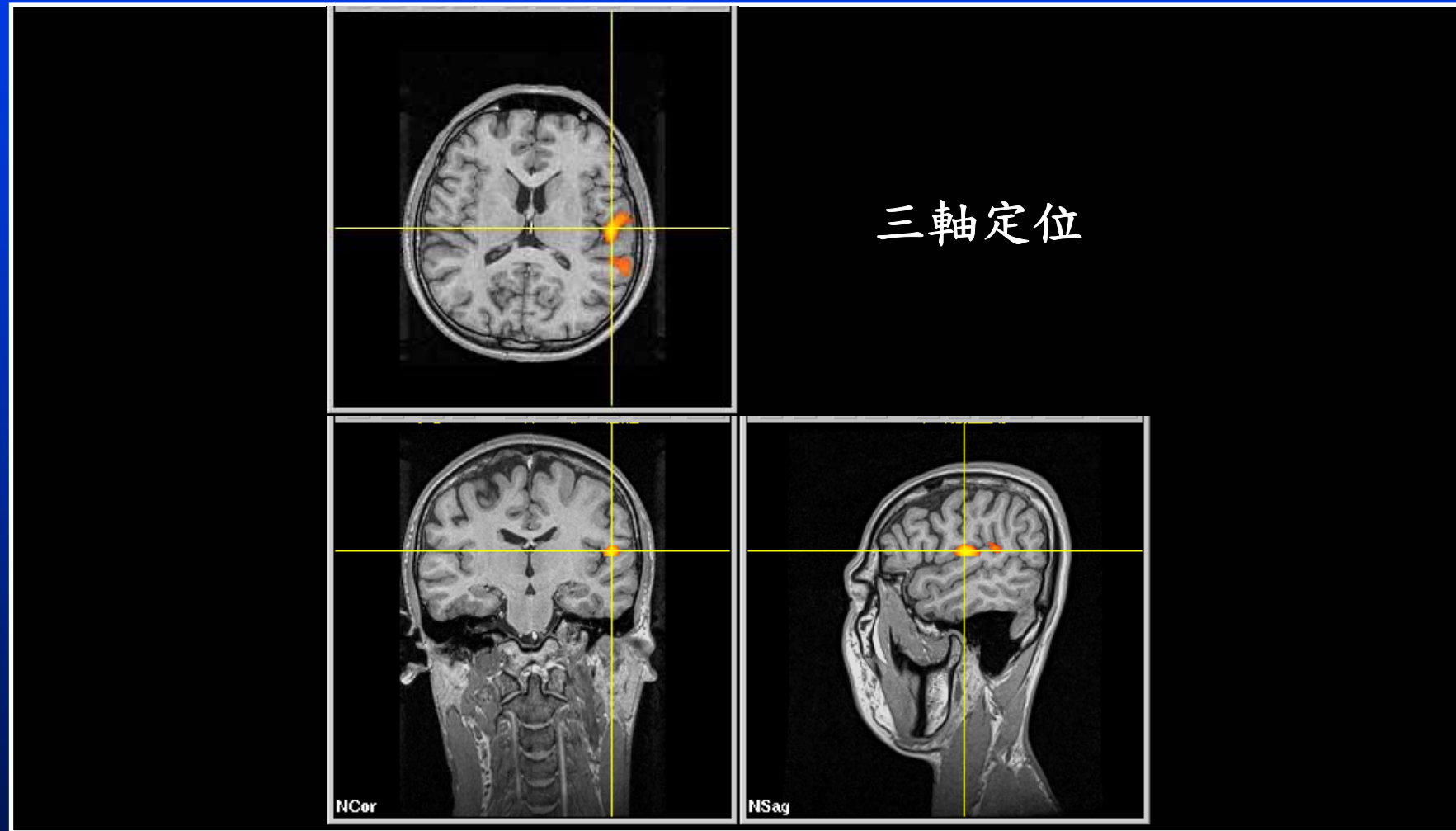
再看個例子

- 順便解釋三維影像顯示的應用
- 略微誇張一些就是了

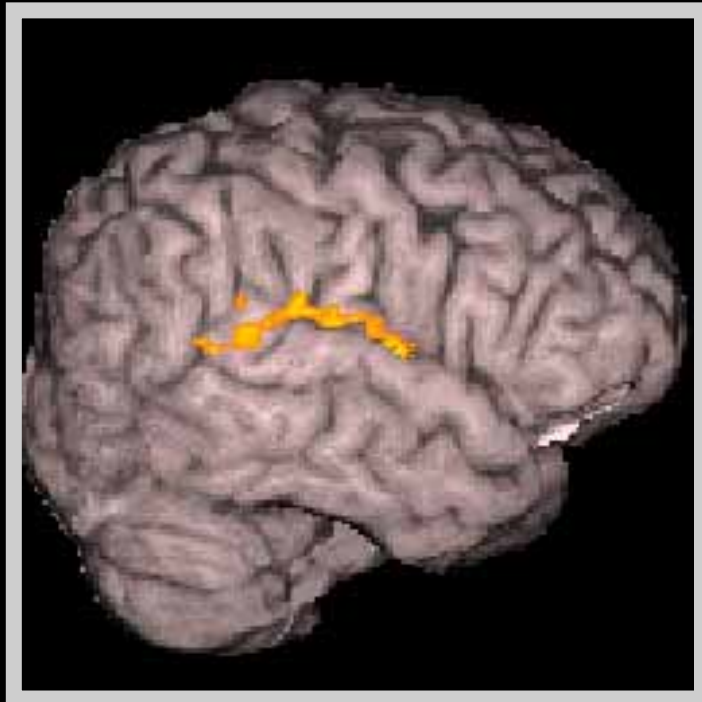
原始的二維影像 (MRI)



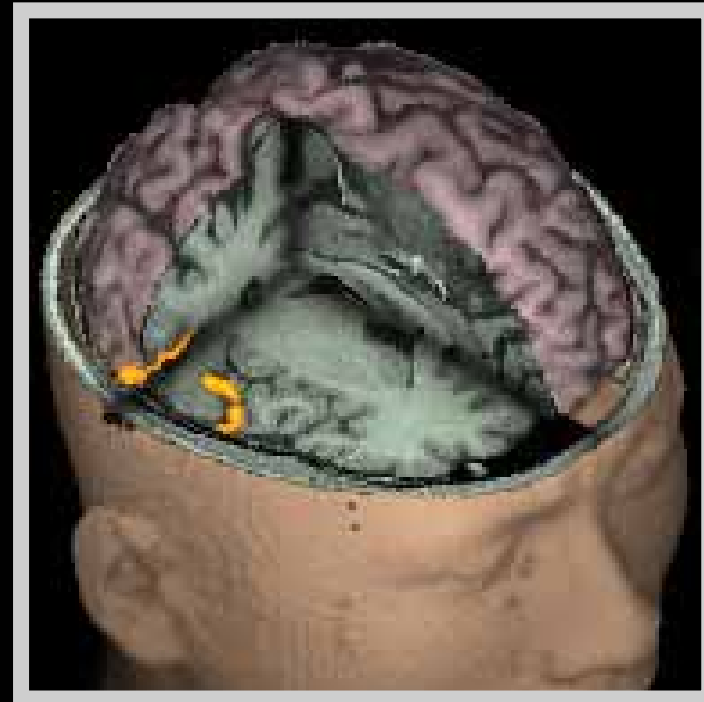
當然可以重組出任何切面方向



也因此可以顯示出 Surface

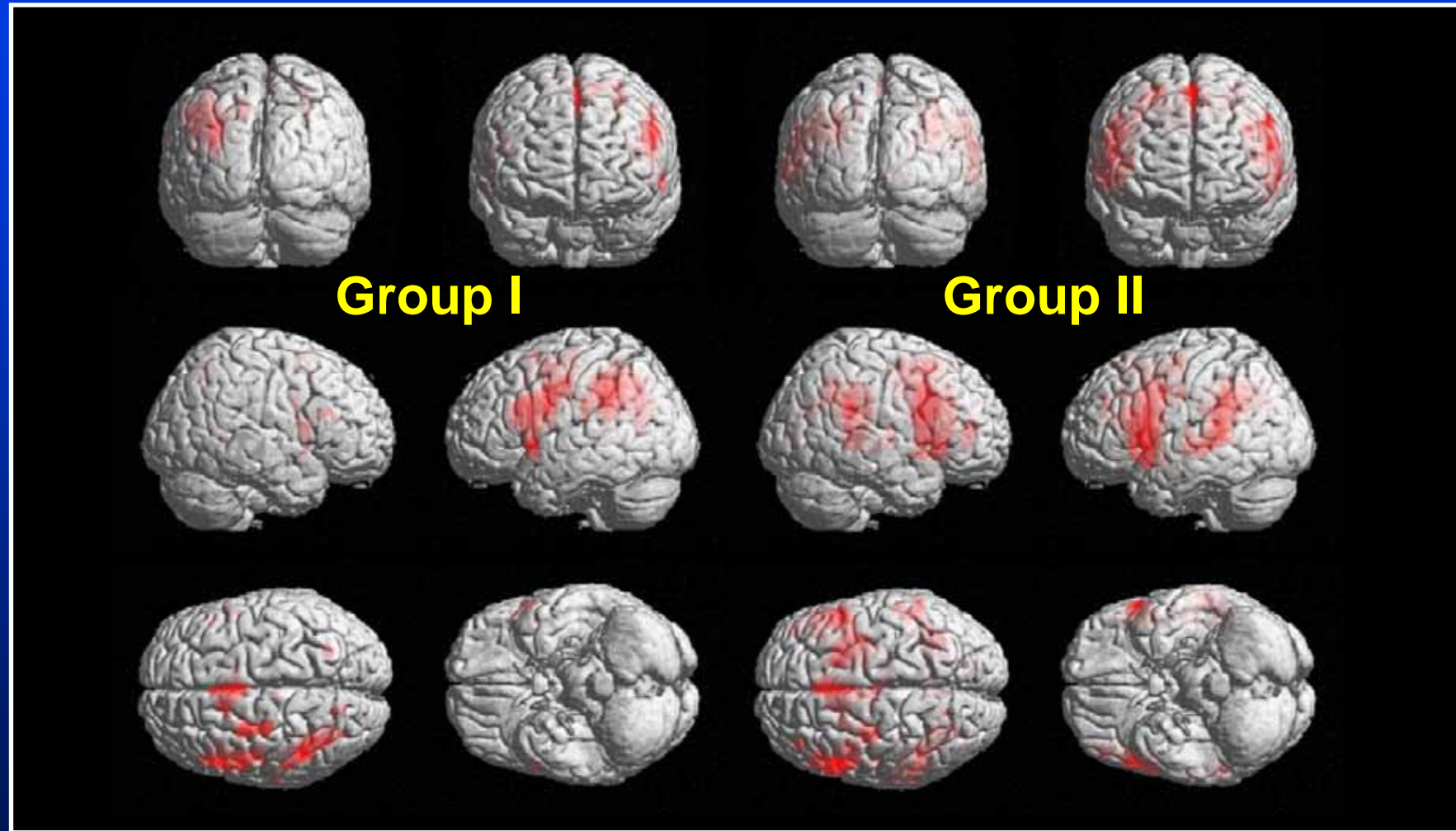


腦部軟膜表面



頭部表面切割

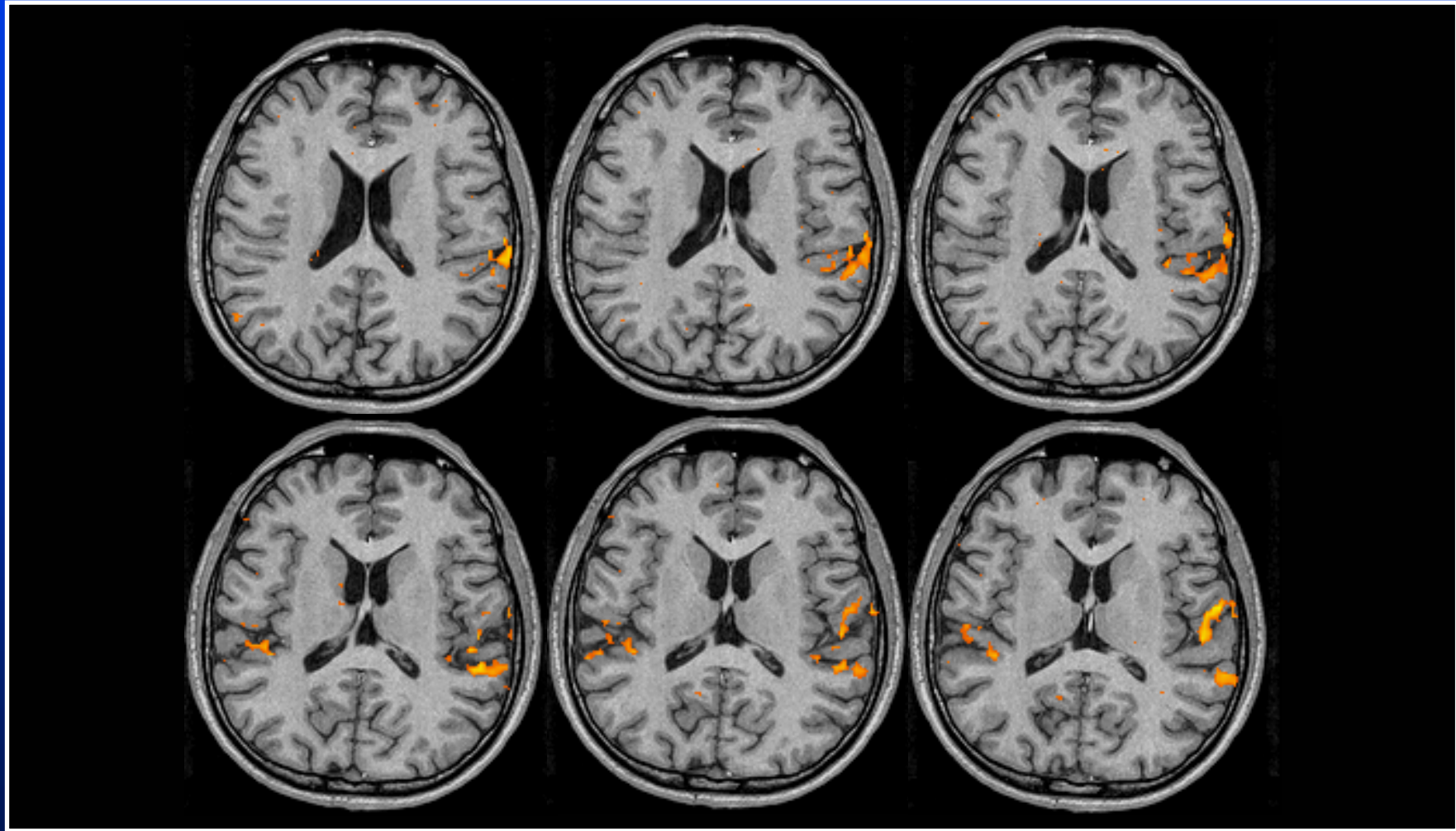
Pial Surface 多方向顯示



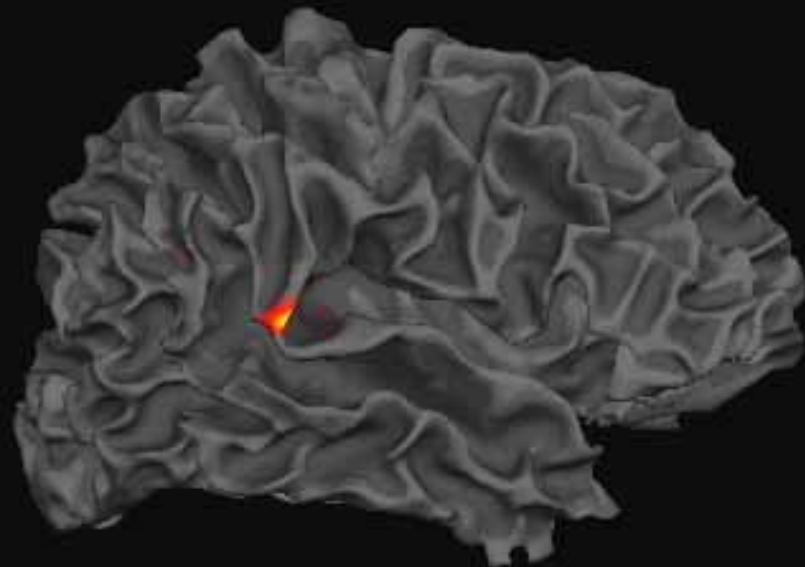
更進一步

- **Pial surface → cortical surface**
 - 腦功能區域位於大腦皮質
- 只要能夠定義邊界，就能計算陰影
- 皮膚 → 軟膜 → 大腦皮質 → 腦室

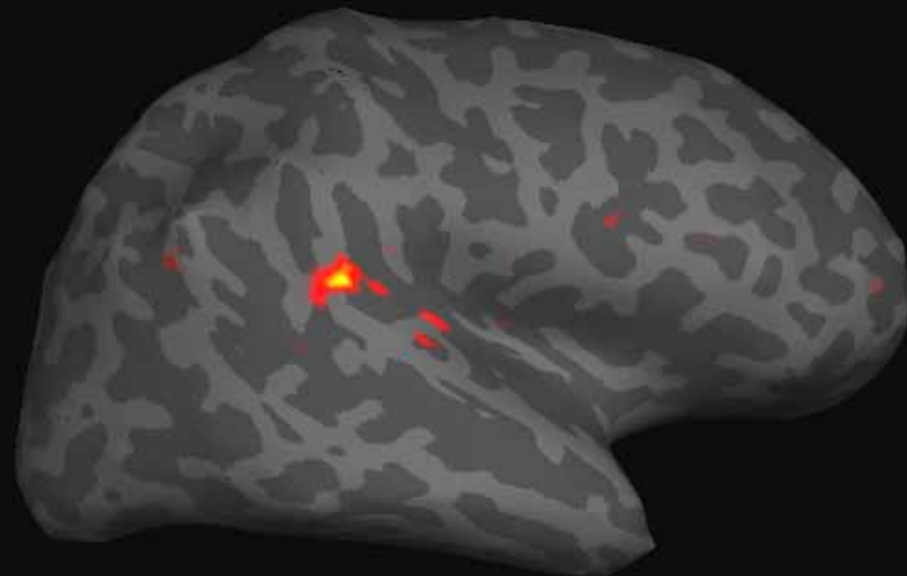
只要影像品質能夠明確定義邊緣



Cortical Surface and Inflation



Cortical surface

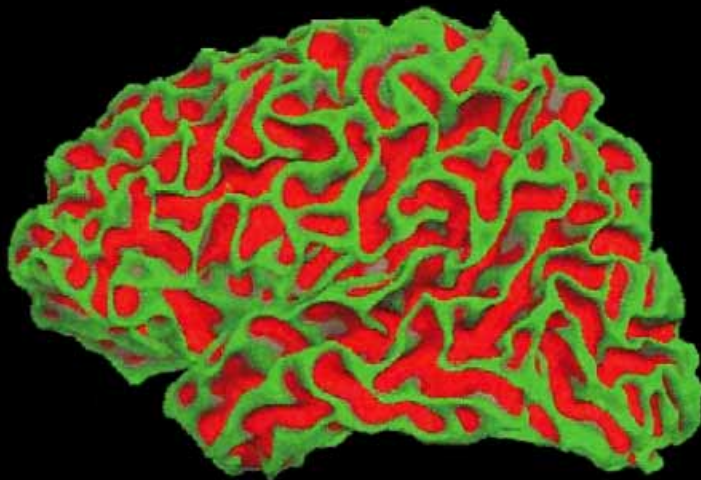


Cortical inflation

Cortical Inflation

- 將縐摺完全吹平
- 凸處與凹處分別顯示
- 顯示內部訊息
 - 進一步定位解剖座標

Cortical Surface and Inflation

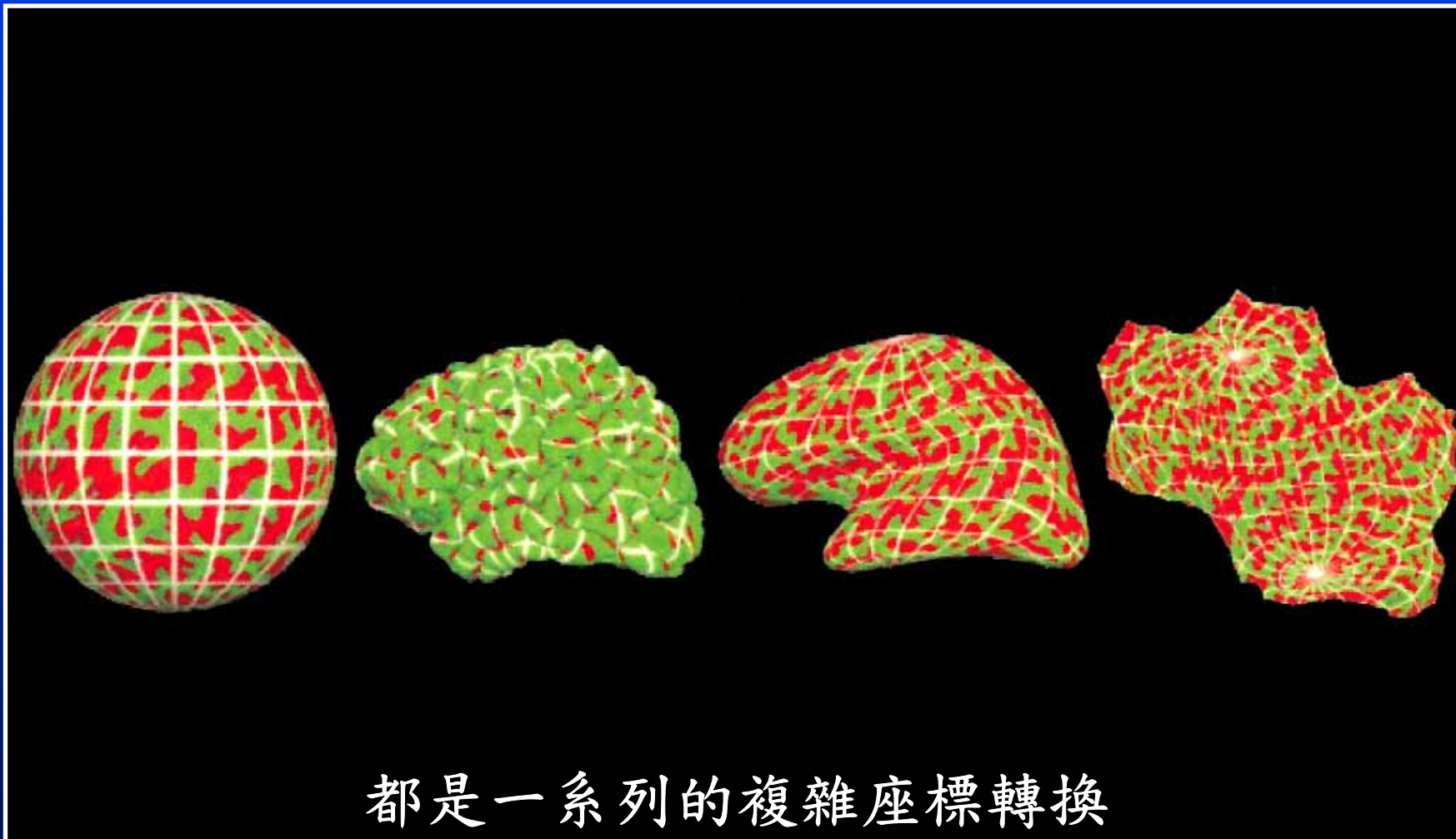


Cortical Surface



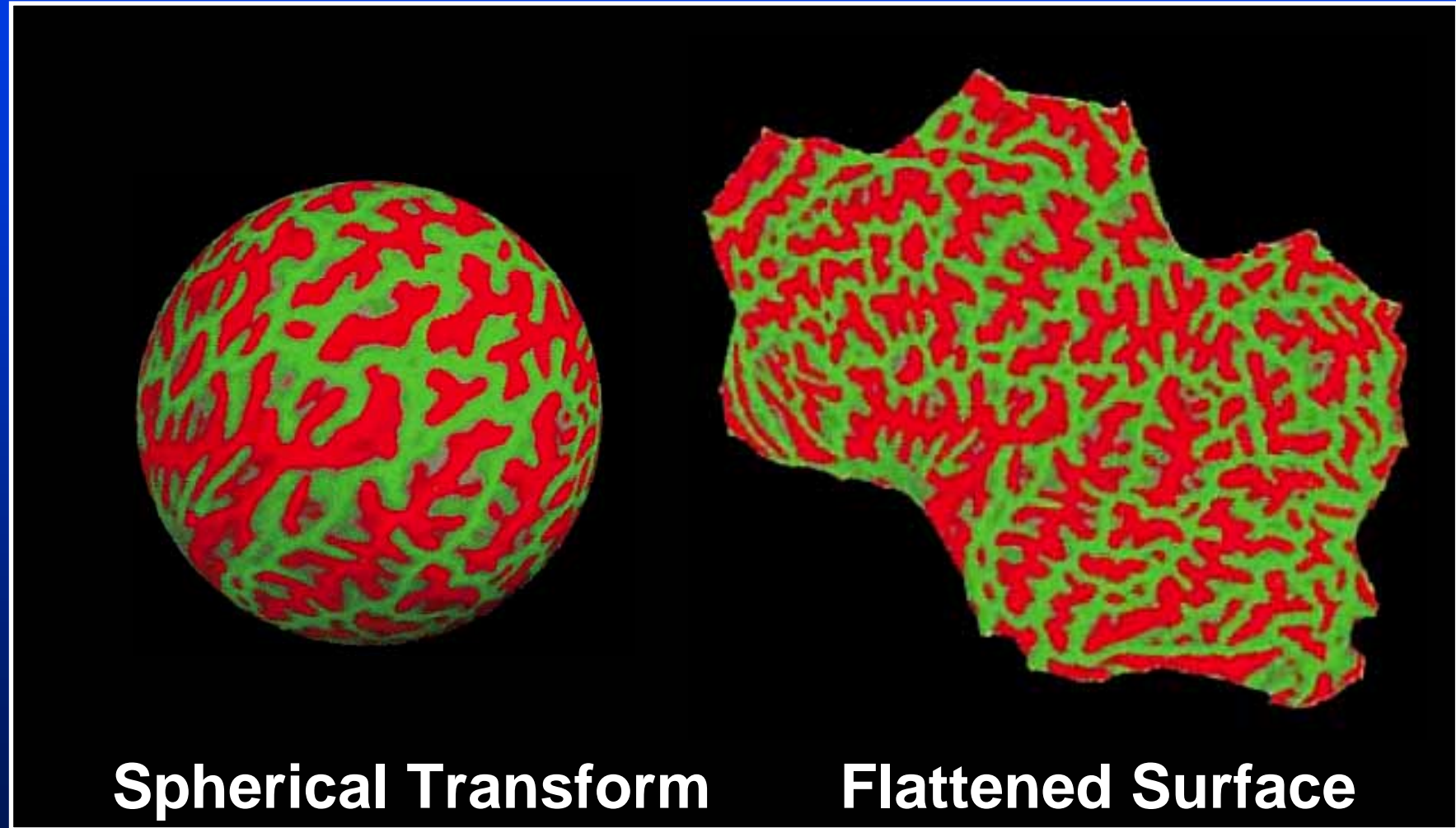
Cortical Inflation

還可以更誇張地經過這種步驟 ...



都是一系列的複雜座標轉換

... 得到這種東東



Spherical Transform

Flattened Surface

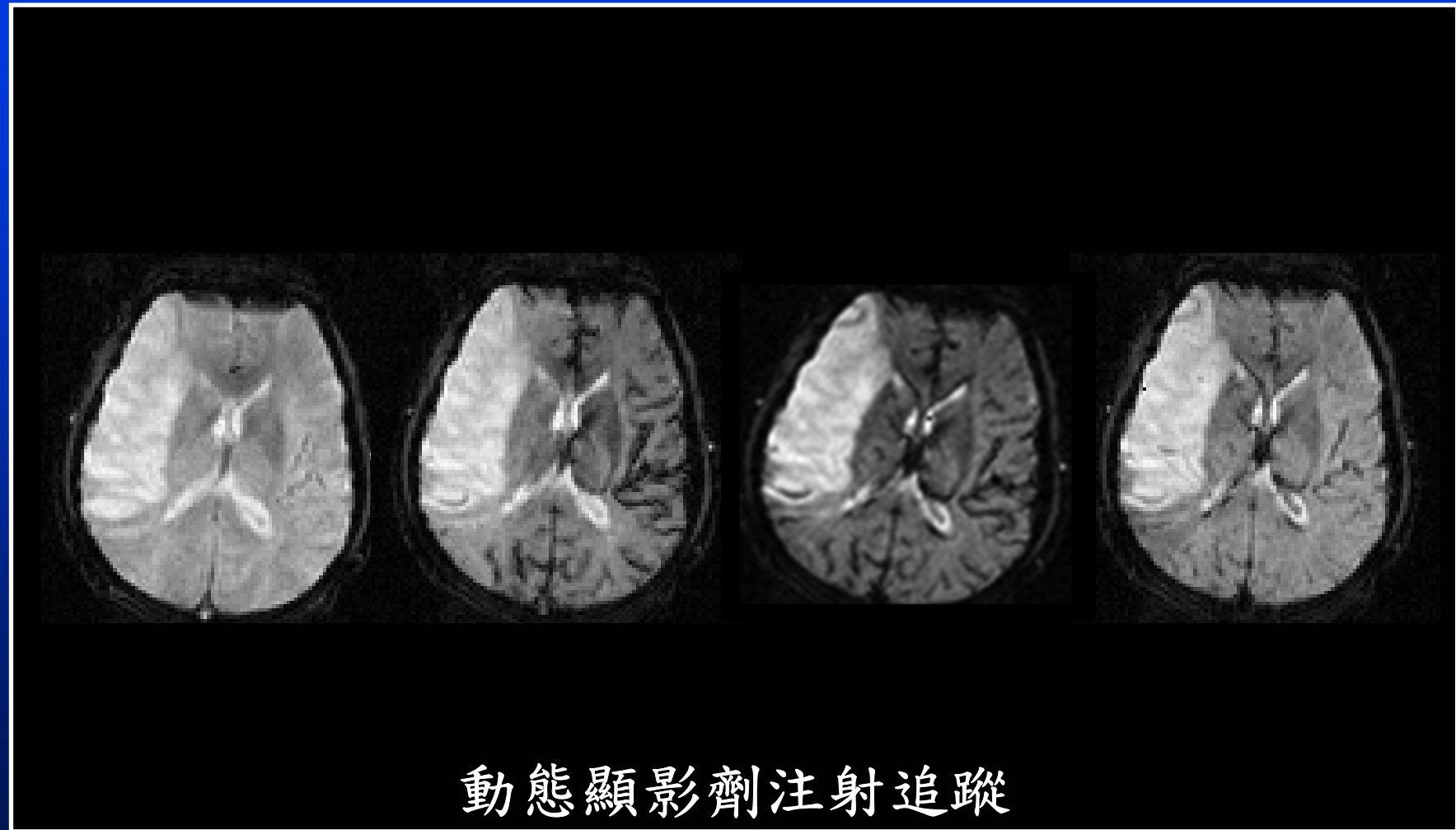
醫學影像處理

- 保證還有沒教到的！
- Image registration
- Image compression
- Image analysis ...

Image Registration (定位)

- 影像形態近似、特徵些微改變
- 特徵近似、形態改變
- 相同位置的不同對比
- 多種影像擷取技術結合
- **Inter-subject analysis**

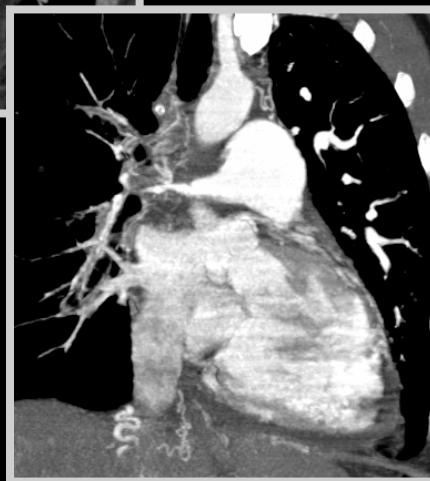
影像定位例 (dynamic MRI + Gd)



影像定位例 (dynamic CT + contrast)



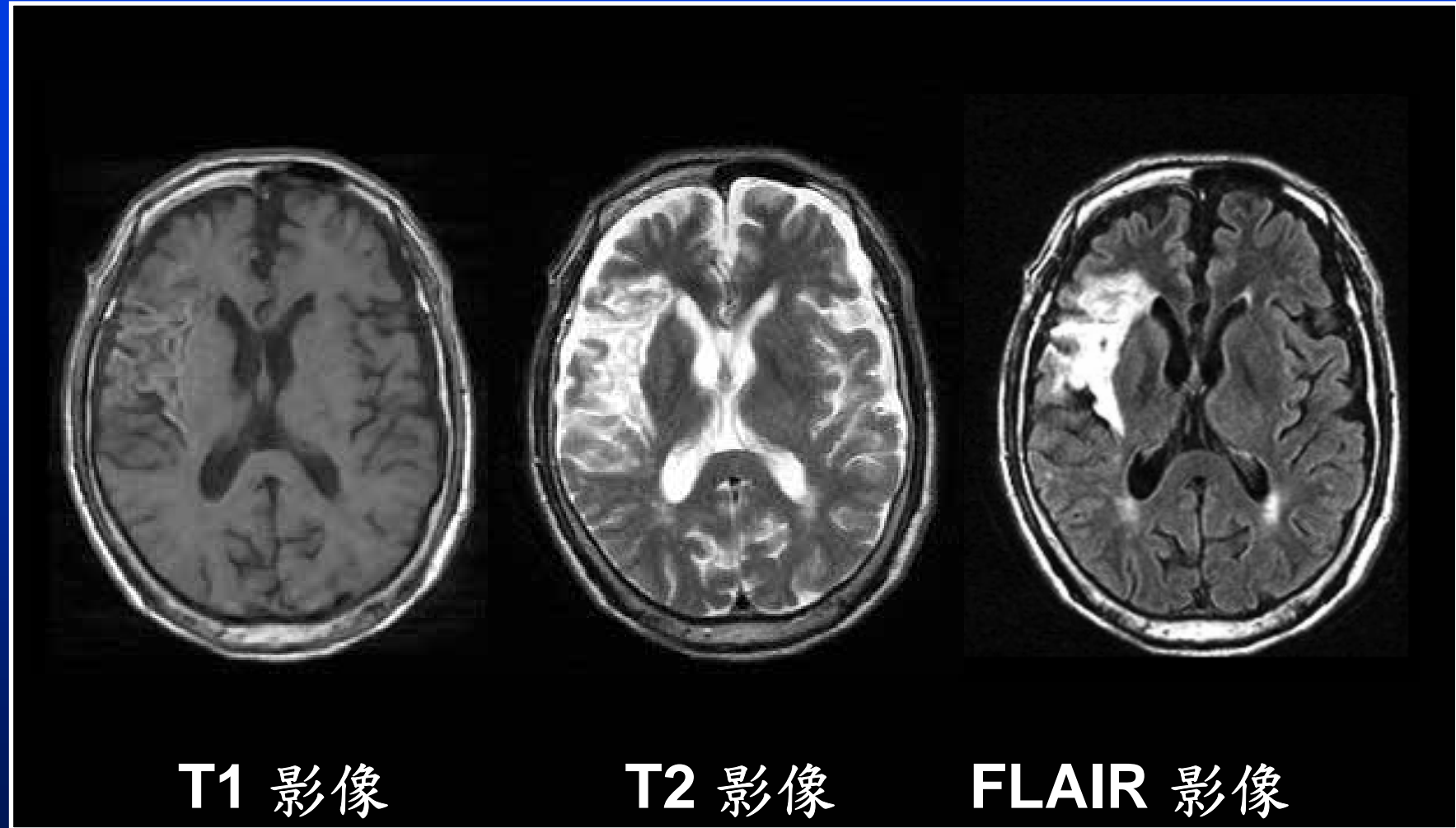
Pulmonary arterial phase



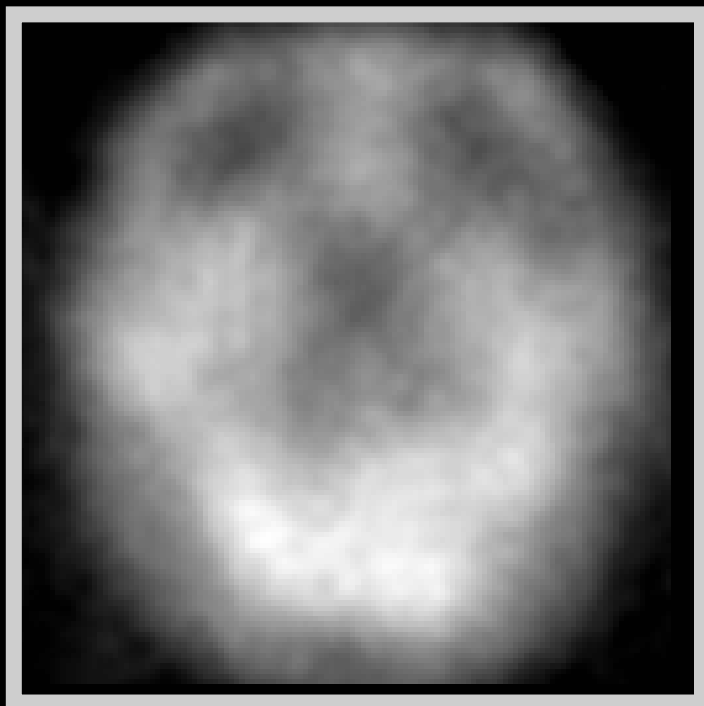
Late (delayed) phase

顯影劑動態 + 呼吸或心跳造成的形態改變

同一位置的不同對比



或是明明就是兩種不同的影像技術



核醫 (功能)



CT (形態)

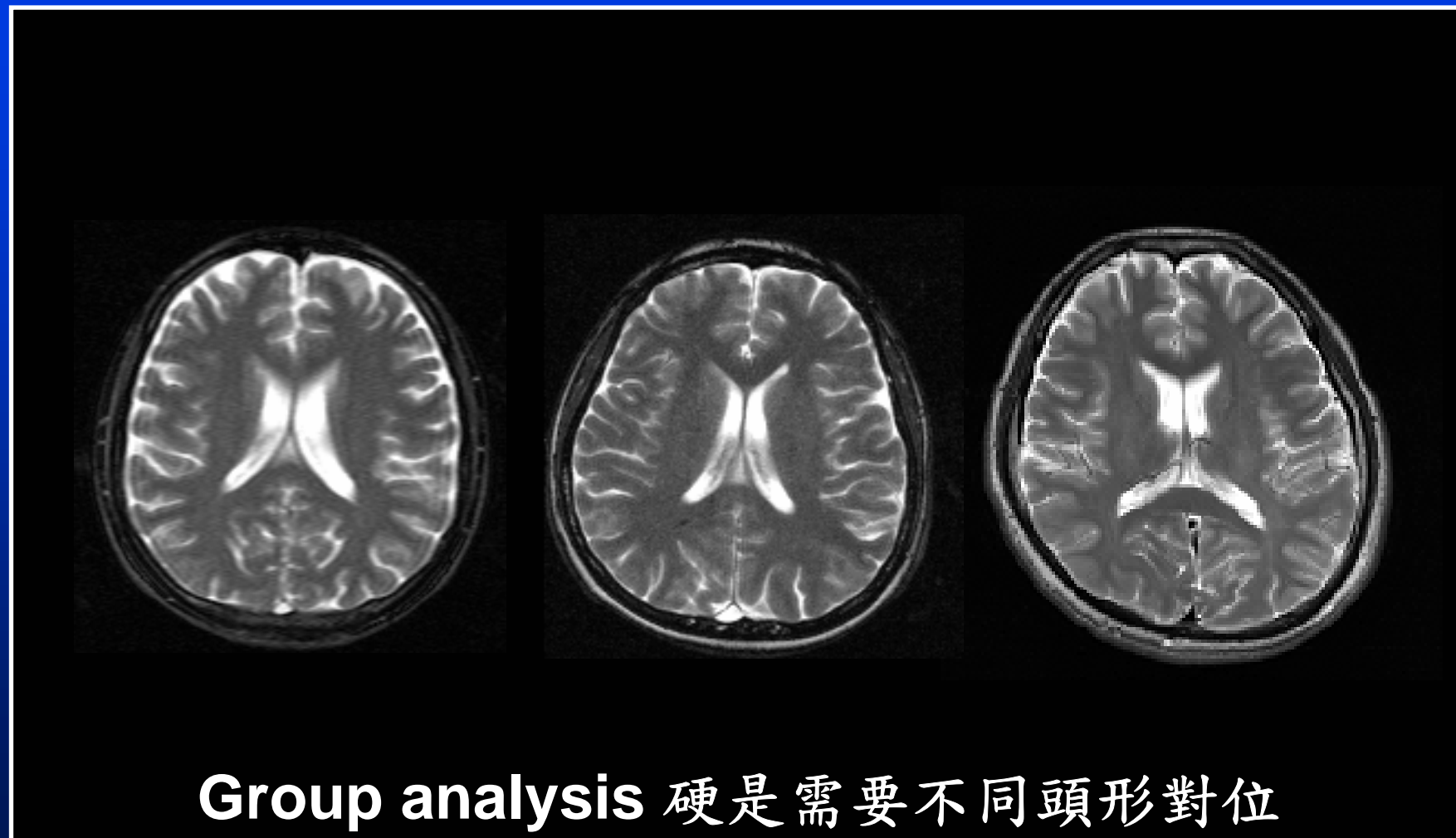
這種東西有商品喔 (PET/CT) !



邊緣 = 形態 彩色 = 功能

PET (功能) + CT (形態) + image fusion

不同受試者



結論：重要但書

- 不要告訴我你已經學完醫學影像了！
 - 今天課程的複雜計算在研究所都只是常備工具而已(都老舊了)
- 有志加入醫學影像研究者敬請三思

主要參考書

- **Pratt WK, Digital image processing, 3rd ed., Wiley, New York, 2001.**
- **Enderle JD et al., Introduction to biomedical engineering, Academic Press, San Diego, CA, 1997.**
- **3D displaying materials courtesy of Dr. Wu Ming-Ting.**

後記：請給我 Feedback

- 期中期末教學意見調查
 - 請各位給我文字意見
 - 請清楚註明不同教授部分
 - 供授課教授或我做為參考
- 直接寄給我 **email** 也沒問題

醫學影像處理

Image Processing

鍾孝文 教授

台大電機系 三軍總醫院放射線部