

7. Kuvankäsittely

Lauri Jetsu
Fysiikan laitos
Helsingin yliopisto

Kuvankäsittely

Yleistä (kuva: @onionesquereality.wordpress.com)

- Kuvankäsittely **Image processing**

www

- ▶ Todellinen kuva $\Rightarrow$ Instrumentti $\Rightarrow$ Havaittu vääristynyt kuva

- ▶ Digitointi, tallennus, pakkaus, kalibrointi, vääristymien poisto, terävöittäminen, ...

- “Hyvä, paha, ruma”

- Lineaarinen $\Leftrightarrow$ Epälineaarinen
- Stabiili detektori $\Leftrightarrow$ Epästabiili ...

- Gaussinen kohina $\Leftrightarrow$ Ei Gaussinen kohina, ylimääräisiä piikkejä, ...

- Suunnittelu $\Rightarrow$ Kohinan ja muiden virhelähteiden minimointi

- Paljon kalibrointikuvia $\Rightarrow$ Samat hyödyt

- ▶ Kuvankäsittely on laaja alue: CCD–kuvan **jälkikäsittely** & **terävöittäminen**

Tavoite: Poistaa häiriöt. Analysoida kuvan sisältö. Löytää myös “näkymättömät” yksityiskohdat

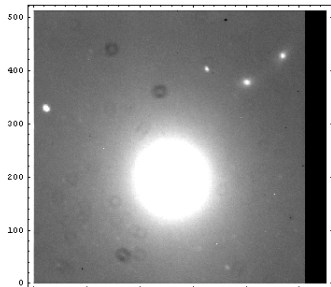
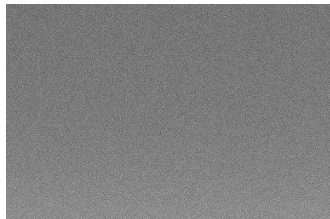


CCD-kuvien jälkikäsittely

CCD-kuvien jälkikäsittely

(kuvat:@astrosurf.com, @library.wolfram.com)

- ▶ **Kalibrointikuvat**
Bias–, **Dark**– ja **Flat-field**–kuvat
- ▶ **Bias-kuva:** $B(x, y)$ (**yläkuva**)
 x = rivi, y = sarake
 - Lisätään pieni bias-jännite
 ⇒ Kuva ei “leikkaudu” luettaessa
 - **Bias** luetaan **ilman valotusta**
 - **Bias** kuvissa valotusaika $t = 0$
 ⇒ Ei pimeävirtaa ≡ **Dark-kuvaa**
 - Luetaan useita **Bias**–kuvia
 ⇒ Saadaan arvio lukukohinalle: R
 - Usean **Bias**–kuvan $B_i(x, y)$ keskiarvo
 ⇒ Kohina vähenee
- ▶ **Ovescan-alue:** alue, jota ei valoteta havaintojen aikana (**alakuva**)
 ⇒ Reaaliaikainen **Bias**–arvio



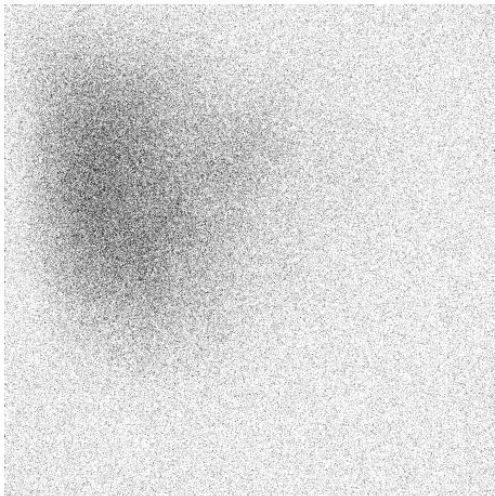
CCD-kuvien jälkikäsittely

CCD-kuvien jälkikäsittely

(kuvat:@www.stsci.edu)

► Dark-kuva: $D(x, y)$

- Termiset elektronit $\Rightarrow$ Pimeävirta
 $\Rightarrow$ Pikselit “valottuvat” ilman valoa
- CCD pidettävä vakio lämpötilassa
Pimeävirta pysyy samana
- Kuumat ja kylmät pikselit
- Pysyvä ominaisuus
- Mitataan aika $t > 0$ **ilman valotusta**
- Sama mittausaika t kuin kohteille
- Useita $D_i(x, y)$ **joka t arvolle**
 $\Rightarrow$ **Dark**-kuvan kohina minimoituu

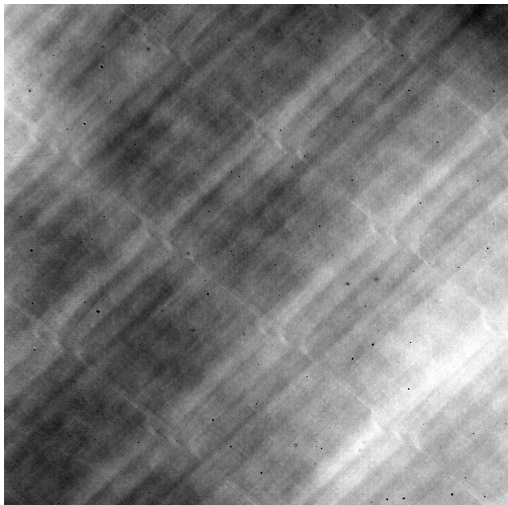


CCD-kuvien jälkikäsittely

CCD-kuvien jälkikäsittely

(kuva:@www.astrosurf.com)

- ▶ **Flat-field-kuva:** $F(x, y)$
 - Pikselin keskinäinen herkkyys vaihtelee
 - Useita kuvia $F_i(x, y)$ **tasaisesti valaistusta pinnasta**
 - ⇒ Käyteään keskiarvoa
 - ⇒ Kohina vähenee
 - $F(x, y)$ erilainen jokaisella aallonpituus kaistalla
 - Keskiarvo $\langle F_i(x, y) \rangle$ skaalataan 1.00... tasolle
 - Kuvan mustat pisteet pölyä CCD:n päällä



CCD-kuvien jälkikäsittely

CCD-kuvien jälkikäsittely (kuva:@www.ursa.fi)

$R_i(x, y) = \text{Raaka kuva numero } i$

1. Vähennetään bias

$$R_i(x, y) - B_i(x, y) \rightarrow R'_i(x, y)$$

$$D_i(x, y) - B_i(x, y) \rightarrow D'_i(x, y)$$

$$F_i(x, y) - B_i(x, y) \rightarrow F'_i(x, y)$$

2. Vähennetään dark

$$R'_i(x, y) - \langle D(x, y) \rangle \rightarrow R''_i(x, y)$$

$$F'_i(x, y) - \langle D(x, y) \rangle \rightarrow F''_i(x, y),$$

missä $\langle D(x, y) \rangle$ keskiarvo kaikista $D'_i(x, y)$

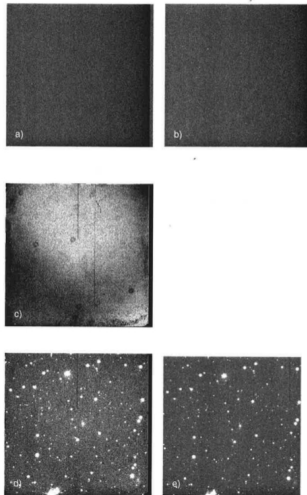
3. Jaetaan flat-fieldillä

$$[R''_i(x, y)] / [\langle F(x, y) \rangle] \rightarrow R'''_i(x, y),$$

missä $\langle F(x, y) \rangle =$ skaalaa keskiarvon kaikki $F'_i(x, y)$ tasolle 1 $\rightarrow$ Alkuperäiset intensiteettitasot säilyvät

4. Muut korjaukset (mm. kosmiset säteet)

Kuvat: a) $\equiv B_i(x, y)$, b) $\equiv D_i(x, y)$, c) $\equiv F_i(x, y)$ d) $\equiv R_i(x, y)$, e) $\equiv R'''_i(x, y)$



Vääristyneen kuvan perusmalli

Vääristyneen kuvan perusmalli

(kuva: @en.wikipedia.org)

$$b(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) * p(\mathbf{x}) + n(\mathbf{x})$$

$b(\mathbf{x})$ = Havaittu kuva

$f(\mathbf{x})$ = Todellinen kuva

$p(\mathbf{x})$ = Laitefunktio

$n(\mathbf{x})$ = Kohina

$\mathbf{x} = (x, y)$ = Paikkavektori

$*$ = Konvoluutio operaatio

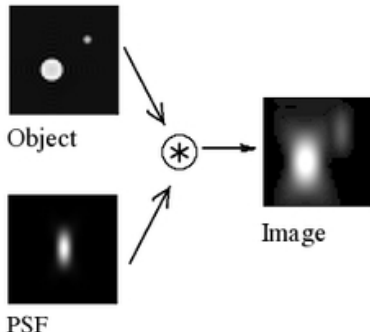
- Yksiulotteiset konvoluution määritelmät

Jatkuva: $(f * g)(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(x - \tau)d\tau$

Diskreetti: $(f * g)_j = \sum_{k=1-m/2}^{m/2} f_k g_{j-k}$

$p(\mathbf{x})$ tasoittaa $\Rightarrow$ yksityiskohtia katoaa

- Tähdet pistemäisiä $\Rightarrow$ Kuussa $p(\mathbf{x}) \equiv$ Point Spread Function **PSF**
- Ideaali $p(\mathbf{x})$: piikki $\equiv \delta$ -funktio & sama kaikilla $\mathbf{x}$
- Todellinen $p(\mathbf{x})$: Diffraktio, Kuvausvirheet, Ilmakehä, ...



www

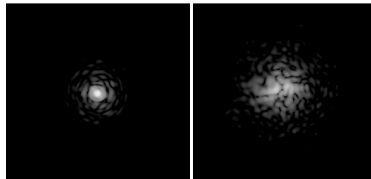
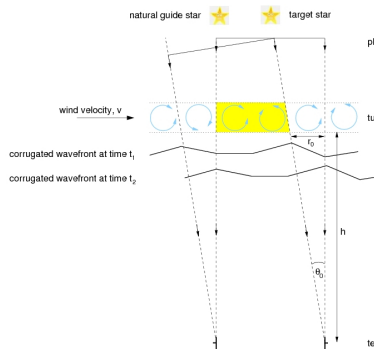
Vääristyneen kuvan perusmalli

Vääristyneen kuvan perusmalli

(kuvat: www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk, www.aanda.org)

Lyhyen valituksen PSF ($t = 1 - 10\text{ms}$)

- ▶ Friedin parametri d_0
(**Fried parameter: r_0**) www
- ▶ “Sen ympyrän muotoisen alueen läpimitta, jossa aaltorintaman vaihe muuttuu alle 1 radiaani”
- ▶ Hyvät olosuhteet: $d_0 \approx 15\text{ cm}$
- ▶ **Adaptiivinen optiikka**
Koherenssiaika $t_0 = d_0/v_0$
 $v_0 = \text{Tuulen nopeus} = 10\text{ m/s}$
 $d_0 = 10\text{ cm}$ aallonpituudella $\lambda = 500\text{ nm}$
 $t_0 = 10\text{ ms}$ **kuvan muutokset** www
- ▶ Suuri peilin $D \Rightarrow$ Monta d_0 peiliä
Monta erillistä aaltorintamaa (s.o.kuvaa)



Vääristyneen kuvan perusmalli

Vääristyneen kuvan perusmalli (kuvat: @aanda.org, @www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk)

Pitkän valotuksen PSF

- Seeing kiekko: Pitkän aikavälin keskiarvo (**Yläkuva**: vääristyy kauempana optisesta akselista)

- Gaussin käyrä**: $I(r) = I_0 e^{-r^2/2\sigma^2}$

$I_0 = I(r=0)$ = keskusintensiteetti, σ = profiilin leveys

- Full Width of Half Maximum = FWHM $\approx 2.35\sigma$

- Moffatin profiili**: $I(r) = I_0 [1 + (2^{1/\beta} - 1)(r/R)^2]^{-\beta}$

R = FWHM/2, $\beta \approx 2.5$ sopiva tähdille

Profiilit optisella akselilla $\Rightarrow$ Kauempana vääristyvät

- **Strehlin** suhde $R = f_s/f_d$ (**Alakuva**)

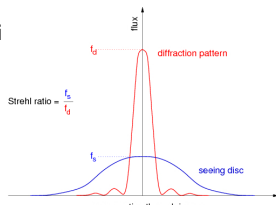
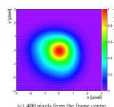
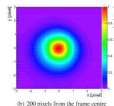
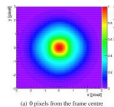
f_d = diffraktion rajoittaman kuvan keskusintensiteetti

$f_s = I_0$ = todellinen havaittu keskusintensiteetti

$$0 \leq R \leq 1$$

- **Sanonta** $R \geq 0.8 \equiv$ “diffraktion rajoittama”

- Käytännössä ilmakehä rajoittaa $\Rightarrow R < 0.1$



Kuvan terävöittäminen

Kuvan terävöittäminen

(kuvat:@gimp-savvy.com,)

► Unsharp masking

$I(x, y)$ = alkuperäinen kuva

$I_B(x, y) = G(x, y) * I(x, y) =$
konvoloitu kuva =
"tasoitettu" kuva (engl. smoothed)

$G(x, y)$ = tasoitus funktio (engl. filter)

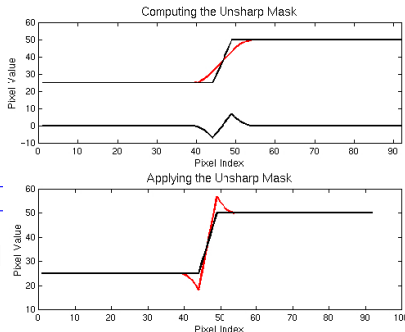
- Esimerkiksi $G =$ **Gaussin funktio** www
keskihajonnalla σ

$I_S(x, y) = I(x, y) + b * [I(x, y) - I_B(x, y)]$
terävöitetty kuva

$0.2 < b < 0.7 \equiv$ skaalausvakio

► Oppikirjan kaava virheellinen

- **Lähde 1:** www $f_{\text{sharp}}(x, y) = f(x, y) + k * [f(x, y) - f_{\text{smooth}}(x, y)]$
- **Lähde 2:** www $F = I + A(I - B)$



Kuvan terävöittäminen

Kuvan terävöittäminen

► Dekonvoluutio

$b(x, y) = f(x, y) * p(x, y) + n(x, y)$, **Ongelma:** Ratkaistava $f(x, y)$

$b(x, y)$ = Havaittu, $f(x, y)$ = Todellinen, $p(x, y)$ = Laitefunktio, $n(x, y)$ = Kohina

Fourier muunnos: $\mathcal{F}\{f(x, y)\} = F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-2\pi i u x} e^{-2\pi i v y} dx dy$

Käänteinen Fourier: $f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{F(u, v)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) e^{2\pi i u x} e^{2\pi i v y} du dv$

Konvoluutio: $f(x, y) * p(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') p(x - x', y - y') dx' dy'$

Relaatio: $\mathcal{F}\{f(x, y) * p(x, y)\} = \mathcal{F}\{f(x, y)\} \mathcal{F}\{p(x, y)\} = F(u, v) P(u, v)$

$b(x, y) = f(x, y) * p(x, y) + n(x, y) \Rightarrow \mathcal{F}\{b(x, y)\} = \mathcal{F}\{f(x, y) * p(x, y)\} + \mathcal{F}\{n(x, y)\}$

$\Leftrightarrow \mathcal{F}\{b(x, y)\} = \mathcal{F}\{f(x, y)\} \mathcal{F}\{p(x, y)\} + \mathcal{F}\{n(x, y)\}$

$\Leftrightarrow B(u, v) = F(u, v) P(u, v) + N(u, v) \Leftrightarrow F(u, v) = [B(u, v) - N(u, v)] / P(u, v)$

Ratkaisu:

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{F(u, v)\} = \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{B(u, v) - N(u, v)}{P(u, v)}\right\}$$

“Käytännössä kuvaa $f(x, y)$ ei koskaan saada tällä tavalla johtuen kohinasta $n(x, y)$.”

Kuvan terävöittäminen

Kuvan terävöittäminen

Ongelmat “ratkaisussa”:

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{F(u, v)\} = \mathcal{F}^{-1}\left\{\frac{B(u, v) - N(u, v)}{P(u, v)}\right\}$$

1. Osassa kuvaa **havaintojen** $b(x, y)$ Fourier muunnos $B(u, v) \ll N(u, v)$ eli **kohina** hallitsee $\Rightarrow$ **“todellisen”** Fourier muunnos $F(u, v)$ kohinainen $\Rightarrow$ **“todellisen”** ratkaisu $f(x, y)$ kohinainen
2. Osassa kuvaa **laitefunktion** Fourier muunnos $P(u, v) \rightarrow 0 \Rightarrow$ Jakolasku ongelmia $\Rightarrow$ **“todellisen”** Fourier muunnos $F(u, v)$ epästabiili $\Rightarrow$ **“todellisen”** ratkaisu $f(x, y)$ epästabiili
3. **“Huonosti asetettu ongelma” (Ill-posed problem)** $\equiv$ Kohina $n(x, y)$ sallii äärettömän määrän erilaisia $f(x, y)$ ratkaisuja kaavassa $b(x, y) = f(x, y) * p(x, y) + n(x, y)$

“Helpon algebrallisen ratkaisun sijaan” ... hjo ...

- Tehdään esimerkiksi alkuarvaus: $f_0(x, y) = b(x, y)$ tai $f_0(x, y) = 0$
 $\rightarrow$ Etsitään iteratiivisia ratkaisuja vaatimalla, että $f(x, y)$ täyttää jonkin (joitakin) lisäkritereitä (lisäkritereitä). Oppikirjassa mainittu: MEM- (Maximum Entropy Method), RL- (Richardson-Lucy) ja CLEAN-algoritmit

Kuvan terävöittäminen

Kuvan terävöittäminen

(kuva: @ursa: havaitseva tähtitiede)

► **Algoritmit:** “Vääristymiä ...
kohinapiikkejä ... fotometrinen
informaatio katoaa ...”

► **NOT:** Kvasaari PKS 0138-097

a) Alkuperäinen kuva

b) Unsharp masking kuva

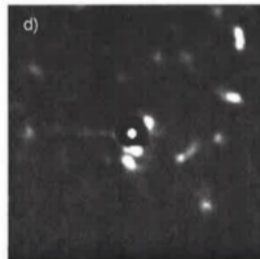
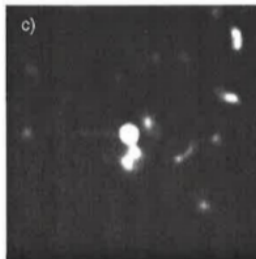
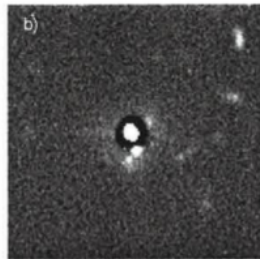
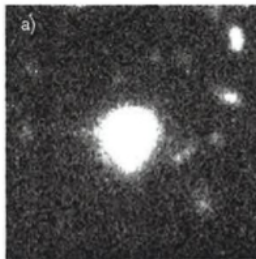
c) MEM algoritmi kuva

d) RL-algoritmi kuva

► Kolme muuta kohdetta
kvasaarin ympärillä ?

► **HST:** Todellisia kohteita!

“Algoritmeja käytetään
melko harvoin
muuhun kuin
kuvien parantamiseen”



Kuvan terävöittäminen

Kuvan terävöittäminen

(kuva: @www.skyandtelescope.com)

- ▶ **Lucky Imaging** [www](#)
- ▶ “Low Light Level” $\equiv$ L3 CCD
 - Elektronien monistus
 $\Rightarrow$ Ei lukukohinaa
 - Luettavissa satoja kertoja sekunnissa
 - Kymmeniä tuhansia 10 ms valotuksia
 - Valitaan parhaat kuvat (1–10%)
 - Diffraktio rajoittama erotuskyky

- ▶ **Yksi esimerkki** [www](#)

Hufnagel (1966) [www](#)

Fried (1978) [www](#)

