

Základy počítačové grafiky

Redukce barevného prostoru

Michal Španěl

Tomáš Milet



Ústav počítačové grafiky a multimédií

Brno 2023

Cíl přednášky

Jak smysluplně a efektivně pracovat s barvami?

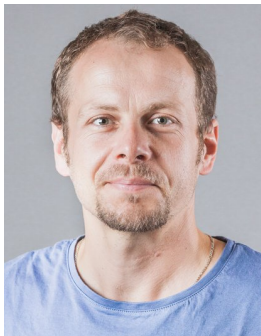
Jak upravit barevná data pro výstup s omezeným počtem barev?



Obsah

- 1 Úvod
- 2 Achromatické obrazy
- 3 Dithering vs. Halftoning
- 4 Thresholding
- 5 Náhodné rozptýlení
- 6 Distribuce chyby
- 7 Maticové rozptýlení
- 8 Barevná paleta 332
- 9 Příklady

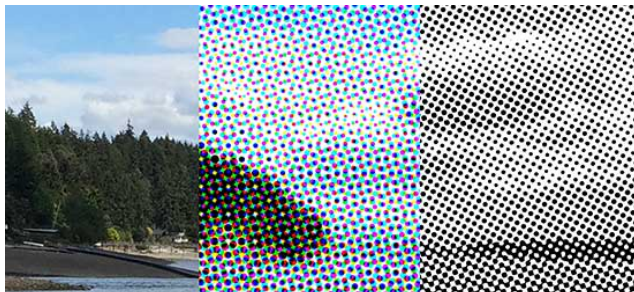
Jak zobrazit fotku volajícího na černo-bílem displeji?



Motivace

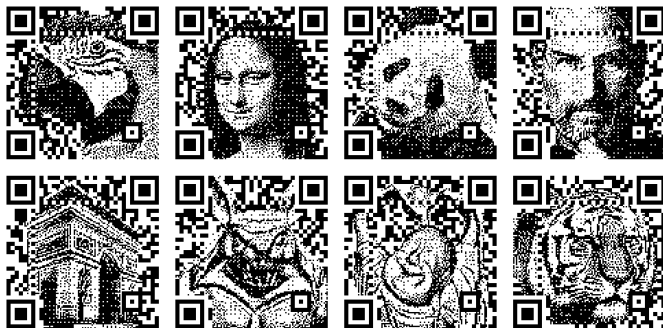
Redukce barevného prostoru pro výstup s omezeným počtem barev

- Tisk na černo-bílé tiskárně (vytvoření šedotónového obrázku).
- Zobrazení na displeji s pouze 256 barvami (mobilní zařízení).
- Komprese obrazových dat omezením počtu barev.



Trochu jiné použití...

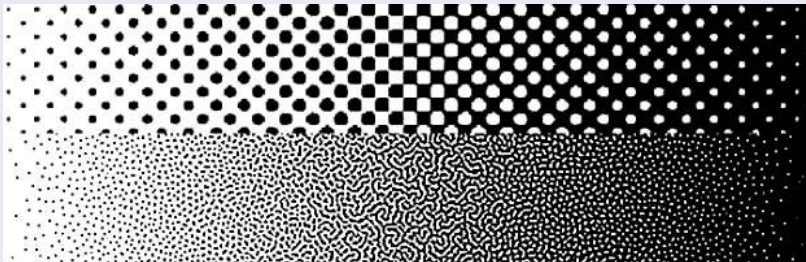
- H.-K. Chu, et al.: Halftone QR Codes (2013) - http://vecg.cs.ucl.ac.uk/Projects/SmartGeometry/halftone_QR/halftoneQR_sigga13.html



Základní principy

Integrační schopnost lidského oka - z několika blízkých barevných bodů si vytvoří barevný odstín

- Kombinace černých a bílých bodů dává stupně šedi.
- Kombinace R, G, B bodů dává barevné odstíny.



Základní principy

Kompresa obrazu - snížení počtu barev

- Při převodu dochází ke ztrátě dat.

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Achromatické obrazy**
- 3 Dithering vs. Halftoning
- 4 Thresholding
- 5 Náhodné rozptýlení
- 6 Distribuce chyby
- 7 Maticové rozptýlení
- 8 Barevná paleta 332
- 9 Příklady

Barevné obrazy

- Barevné modely *RGB*, *HSV*, ...
- Typicky tři barevné kanály, každý 8 bitů = *24 bitů na pixel*.



Achromatické obrazy

Bílé světlo

Všechny vlnové délky mají stejnou intenzitu.

- $> 80\%$ odrazu - bílá barva.
- $< 3\%$ odrazu - černá barva.

Achromatické obrazy

Bílé světlo

Všechny vlnové délky mají stejnou intenzitu.

- $> 80\%$ odrazu - bílá barva.
- $< 3\%$ odrazu - černá barva.

Vztah barvy a intenzity

- Empirický vztah:

$$I = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

Převod barevného prostoru na 256 stupňů šedi.



Rozlišení obrazu

Prostorové rozlišení

- Šířka a výška obrazu $width \times height$ pixelů

Rozlišení intenzit

- Každý pixel má pouze n bitů pro uložení hodnoty pixelu

Rozlišení obrazu

Prostorové rozlišení

- Šířka a výška obrazu $width \times height$ pixelů

Rozlišení intenzit

- Každý pixel má pouze n bitů pro uložení hodnoty pixelu

Rozlišení v čase

- Monitor vykresluje s omezenou frekvencí f Hz (FPS)

Achromatické obrazy, pokr.

Obrazy ve stupních šedi (šedotónové/grayscale obrazy)

- Teoreticky stačí 32-64 stupňů (citlivost oka), prakticky 256 stupňů



Achromatické obrazy, pokr.

Černo-bílé (monochromatické, black-and-white, B/W) obrazy

- Jen dvě úrovně - černá/bílá.

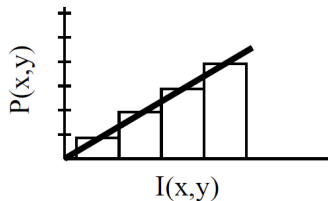


Kvantizace

Chyba vznikající omezením rozlišení intenzity

- Digitální obraz má omezený počet bitů na pixel
- Zobrazovací zařízení má omezený dynamický rozsah

$$P(x, y) = \text{trunc}(I(x, y) + 0.5)$$

 $I(x,y)$  $P(x,y)$

(4 bits per pixel)

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Achromatické obrazy
- 3 Dithering vs. Halftoning**
- 4 Thresholding
- 5 Náhodné rozptýlení
- 6 Distribuce chyby
- 7 Maticové rozptýlení
- 8 Barevná paleta 332
- 9 Příklady

Metody redukce šedotónového obrazu na černo-bílý

Dithering (rozptylování)

- Nahrazení původních hodnot intenzity šedé černými a bílými body.
- Snaha o vizuálně maximálně odpovídající podobu.
- Zachovává rozměry obrazu.
- Výstup na obrazovku.

Metody redukce šedotónového obrazu na černo-bílý

Dithering (rozptylování)

- Nahrazení původních hodnot intenzity šedé černými a bílými body.
- Snaha o vizuálně maximálně odpovídající podobu.
- Zachovává rozměry obrazu.
- Výstup na obrazovku.

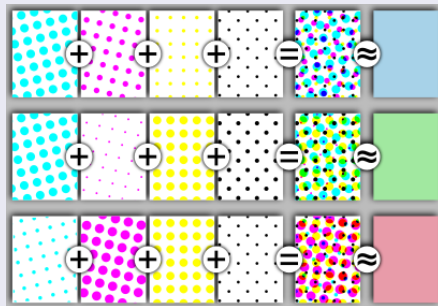
Halftoning (polotónování)

- Každý pixel nahrazen vzorem černých a bílých bodů dané hodnoty.
- Zvětšuje rozměry obrazu.
- Výstup na tiskárnu.

Metody redukce šedotónového obrazu na černo-bílý

Barevné obrazy

- Každý kanál se upravuje zvlášť.
- Další výklad pro převod gray na mono!



Dithering

Základní metody

- Prahování
- Náhodné rozptýlení
- Distribuce chyby
- Maticové rozptýlení

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Achromatické obrazy
- 3 Dithering vs. Halftoning
- 4 Thresholding**
- 5 Náhodné rozptýlení
- 6 Distribuce chyby
- 7 Maticové rozptýlení
- 8 Barevná paleta 332
- 9 Příklady

Prahování (angl. thresholding)

- Rozdělení pixelů obrazu podle prahové hodnoty T .
- Nejprimitivnější metoda.



Prahování, pokr.

Algoritmus

- Vstupní obraz $I(x,y)$, výstupní binární obraz $G(x,y)$.
- Pro každý pixel obrazu:

$$G(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{pro } I(x,y) \geq T \\ 0 & \text{pro } I(x,y) < T \end{cases}$$

Prahování, pokr.

Algoritmus

- Vstupní obraz $I(x,y)$, výstupní binární obraz $G(x,y)$.
- Pro každý pixel obrazu:

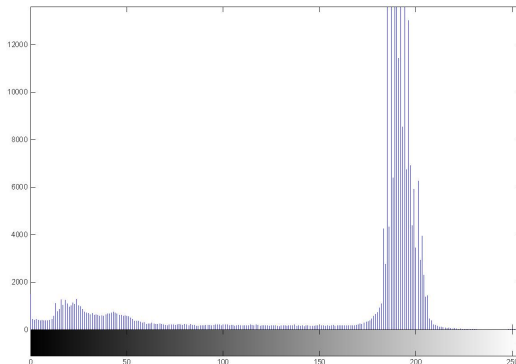
$$G(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{pro } I(x,y) \geq T \\ 0 & \text{pro } I(x,y) < T \end{cases}$$

+/-

- Uspokojující pro obrazy s velkým kontrastem.
- Značná degradace obrazu.
- Jak zvolit vhodný práh?

Optimální výběr prahu

- Práh zvolený uživatelem
- Střední hodnota, medián, apod.
- Analýza histogramu



Obsah

- 1 Úvod
- 2 Achromatické obrazy
- 3 Dithering vs. Halftoning
- 4 Thresholding
- 5 Náhodné rozptýlení**
- 6 Distribuce chyby
- 7 Maticové rozptýlení
- 8 Barevná paleta 332
- 9 Příklady

Náhodné rozptýlení

- Hodnota prahu generována náhodně pro každý pixel obrazu.
- Efekt "hrubého zrna" simulující staré fotografie.



Náhodné rozptýlení, pokr.

Algoritmus

- Pro každý pixel obrazu:

$$G(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{pro } I(x, y) \geq \text{random}(I_{\max}) \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

Náhodné rozptýlení, pokr.

Algoritmus

- Pro každý pixel obrazu:

$$G(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{pro } I(x, y) \geq \text{random}(I_{\max}) \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$$

+/-

- Jednoduchá a rychlá metoda.
- Zachovává jasové poměry v obraze.
- Rovnoměrná intenzita u velkých ploch.
- Vhodná pro velké obrazy s konstantními plochami .
- Lze modifikovat pro obecný počet úrovní. **Jak?**

Náhodné rozptýlení, pokr.

Algoritmus 2

Pro každý pixel obrazu:

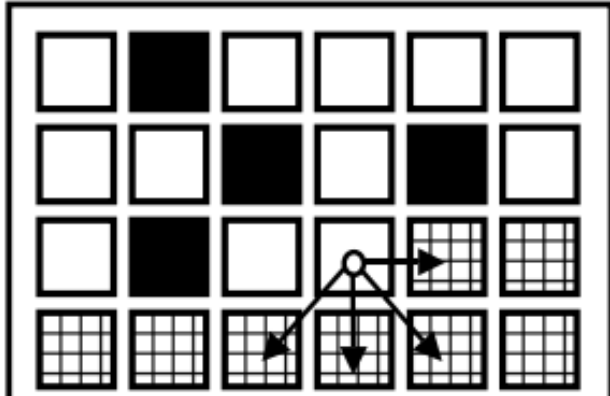
- Inicializuj $G(x, y) = 0$
- Generuj náhodné prahy $T_1, \dots, T_n$
- Je-li $I(x, y) > T_i$, pak $G(x, y)_+ = 1$

Obsah

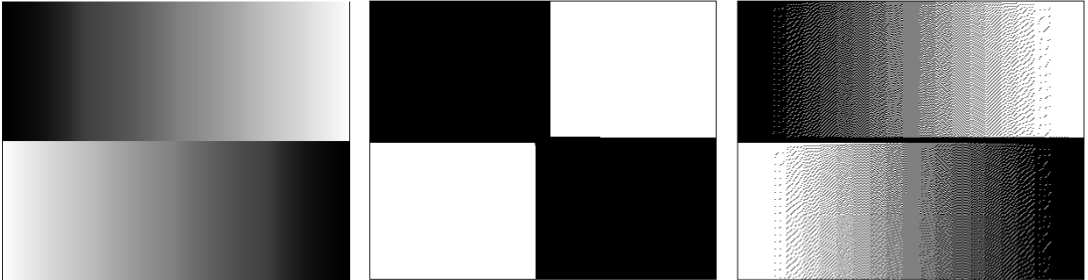
- 1 Úvod
- 2 Achromatické obrazy
- 3 Dithering vs. Halftoning
- 4 Thresholding
- 5 Náhodné rozptýlení
- 6 Distribuce chyby**
- 7 Maticové rozptýlení
- 8 Barevná paleta 332
- 9 Příklady

Distribuce chyby

- Distribuce vznikající chyby okolním pixelům.
- Maximální využití vstupní informace.



Prahování vs. prahování s distribucí chyby



Distribuce chyby

Algoritmus

Pro každý pixel obrazu:

- Urči hodnotu $G(x, y)$ podle dané metody rozptýlení.
- Výpočti chybu E
Je-li $G(x, y) = 1$, pak $E = I(x, y) - I_{max}$
jinak $G(x, y) = 0$ a $E = I(x, y) - 0$
- Distribuce chyby sousedům (modifikace hodnot pixelů).

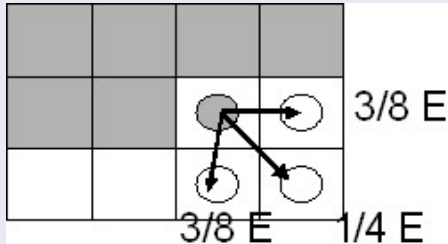
Příklad rozptýlení s distribucí chyby



Distribuce chyby, pokr.

- Různé metody rozptýlení hodnot (nejčastěji prahování).
- Různé metody distribuce chyby (Floyd, Bayer, Burkes, Stucky).

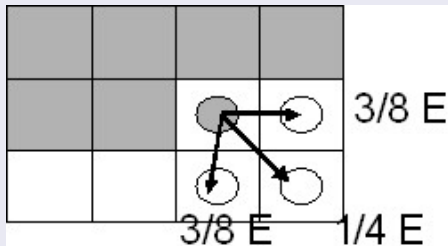
Floyd-Steinberg



Distribuce chyby, pokr.

- Různé metody rozptýlení hodnot (nejčastěji prahování).
- Různé metody distribuce chyby (Floyd, Bayer, Burkes, Stucky).

Floyd-Steinberg



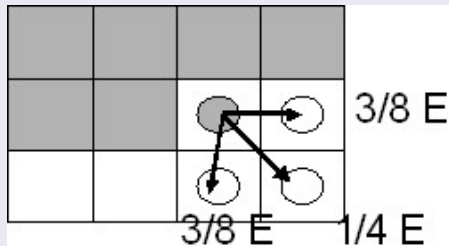
Pozn.

- Pozor na přetečení rozsahu hodnot pixelu!
- Jak by se dalo řešit?

Distribuce chyby, pokr.

- Různé metody rozptýlení hodnot (nejčastěji prahování).
- Různé metody distribuce chyby (Floyd, Bayer, Burkes, Stucky).

Floyd-Steinberg



Pozn.

- Pozor na přetečení rozsahu hodnot pixelu!
- **Jak by se dalo řešit?**
- Omezení (saturace) hodnot
- Pomocný řádkový buffer o velikosti $N + 1$

Příklady



Originální barevný RGB obraz



Barevný obraz s paletou 16 barev.



Barevný obraz s paletou 16 barev. Použita distribuce chyby.



256 stupňů šedi

(FIT VUT v Brně)



16 stupňů šedi.

Základy počítačové grafiky



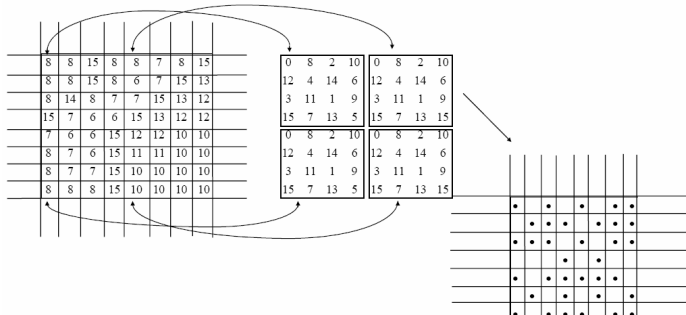
16 stupňů šedi, distribuce chyby

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Achromatické obrazy
- 3 Dithering vs. Halftoning
- 4 Thresholding
- 5 Náhodné rozptýlení
- 6 Distribuce chyby
- 7 Maticové rozptýlení**
- 8 Barevná paleta 332
- 9 Příklady

Maticové rozptýlení

- Porovnání pixelů obrazu s odpovídajícími hodnotami distribuční (rozptylovací) matice a prahování.
- Dithering - plochu obrazu pokryjeme maticemi.
- Halftoning - každý pixel nahradíme maticí.



Maticové rozptýlení

Algoritmus

Pro každý pixel obrazu:

- Inicializuj $G(x, y) = 0$
- Je-li $I(x, y) > M_{x_m, y_m}$, pak $G(x, y) + = 1$
 $x_m = x \bmod n$
 $y_m = y \bmod n$
 $n \dots$ řád matice

Rozptylové matice $n \times n$ různých řádů



1



2



3

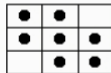
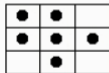
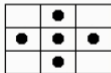
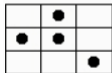
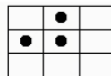
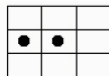
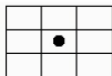
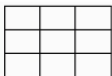


4

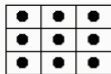
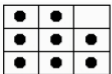


5

$$\approx^{(2)} T = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}$$



$$\approx^{(3)} T = \begin{bmatrix} 7 & 9 & 5 \\ 2 & 1 & 4 \\ 6 & 3 & 8 \end{bmatrix}$$



Rozptylové matice, pokr.

Příklady používaných matic

$$M_d = \begin{pmatrix} 0 & 12 & 3 & 15 \\ 4 & 8 & 11 & 7 \\ 2 & 14 & 1 & 13 \\ 10 & 6 & 9 & 5 \end{pmatrix}, \quad M_p = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 & 2 \\ 8 & 12 & 13 & 6 \\ 4 & 15 & 14 & 10 \\ 0 & 11 & 7 & 3 \end{pmatrix}$$

Rozptylové matice, pokr.

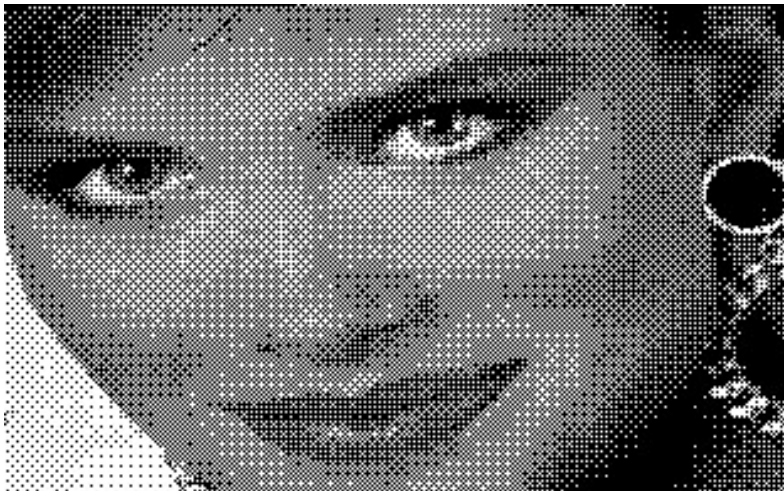
Příklady používaných matic

$$M_d = \begin{pmatrix} 0 & 12 & 3 & 15 \\ 4 & 8 & 11 & 7 \\ 2 & 14 & 1 & 13 \\ 10 & 6 & 9 & 5 \end{pmatrix}, \quad M_p = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 & 2 \\ 8 & 12 & 13 & 6 \\ 4 & 15 & 14 & 10 \\ 0 & 11 & 7 & 3 \end{pmatrix}$$

Pozn.

- Matice vyšších řádů lze algoritmicky vytvářet z menších.
- Pozor na permutace uvnitř a na okrajích matice → artefakty (pruhy, vzory) v obraze.

Dithering pomocí matice M_d .



Halftoning pomocí matice M_p - upravený rozměr.



Obsah

- 1 Úvod
- 2 Achromatické obrazy
- 3 Dithering vs. Halftoning
- 4 Thresholding
- 5 Náhodné rozptýlení
- 6 Distribuce chyby
- 7 Maticové rozptýlení
- 8 Barevná paleta 332**
- 9 Příklady

Barevná paleta 332

- Redukce RGB obrazu (16 mil. barev) na 256 barevný obraz.
- R,G kanály - 3 bity.
- B kanál - 2 bity.

Barevná paleta 332

- Redukce RGB obrazu (16 mil. barev) na 256 barevný obraz.
- R,G kanály - 3 bity.
- B kanál - 2 bity.

Algoritmus

Pro každý pixel obrazu:

- Nalezni nejbližší barvu z palety 332 $\rightarrow$ index i .
- Nastav hodnotu pixelu $G(x,y) = i$.
- Případně určení chyby hodnot R, G, B a distribuce chyby.

Příklad redukce barevného prostoru RGB zmenšením počtu barev paletou 332.



Příklad redukce barevného prostoru RGB zmenšením počtu barev paletou 332.



Generování barevné palety 332

Výpočet barev

$$R = ((i >> 5) * 255) / 7$$

$$G = (((i >> 2) \& 7) * 255) / 7$$

$$B = ((i \& 3) * 255) / 3$$

Generování barevné palety 332

Výpočet barev

$$R = ((i \gg 5) * 255) / 7$$

$$G = (((i \gg 2) \& 7) * 255) / 7$$

$$B = ((i \& 3) * 255) / 3$$

Index barvy v paletě

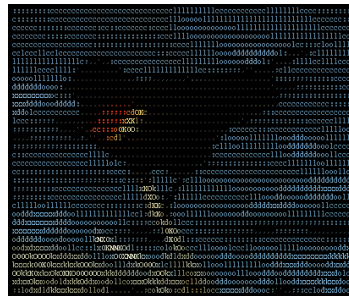
$$I = (R_3 \ll 5) + (G_3 \ll 2) + B_2$$

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Achromatické obrazy
- 3 Dithering vs. Halftoning
- 4 Thresholding
- 5 Náhodné rozptýlení
- 6 Distribuce chyby
- 7 Maticové rozptýlení
- 8 Barevná paleta 332
- 9 Příklady**

ASCII Art

- Obrazce tvořené ASCII znaky.
- Využívají integrační vlastnost lidského oka.



http://en.wikipedia.org/wiki/ASCII_art

Převod šedotónového obrazu do ASCII

- Části obrazu o velikosti nahradíme jedním znakem (bloky např. 7×12).
- Vhodný znak vybereme na základě průměrné intenzity v bloku.
- Černý blok (~ 0) $\rightarrow$ ' '
- Bílý blok (~ 255) $\rightarrow$ '#'

Převod šedotónového obrazu do ASCII

- Části obrazu o velikosti nahradíme jedním znakem (bloky např. 7×12).
- Vhodný znak vybereme na základě průměrné intenzity v bloku.
- Černý blok (~ 0) $\rightarrow$ ' '
- Bílý blok (~ 255) $\rightarrow$ '#'

Příklady používaných znakových sad

"# "
"10"
"@%#*+=-:~."
"#WMNRXVYlti+=;:,~."

A black and white close-up portrait of a woman with a warm, smiling expression. She has dark, wavy hair and is wearing large, dark hoop earrings. Her eyes are looking slightly off-camera, and her lips are curved upwards in a gentle smile. The lighting is soft, highlighting her facial features.

[illegible]

A black and white close-up portrait of a woman with a warm, smiling expression. She has dark, wavy hair and is wearing large, dark hoop earrings. Her eyes are looking slightly off-camera, and her lips are curved in a gentle smile. The lighting is soft, highlighting her facial features.

[illegible]

A black and white close-up portrait of a woman with a warm, smiling expression. She has dark, wavy hair and is wearing large, dark hoop earrings. Her eyes are looking slightly off-camera, and her lips are curved in a gentle smile. The lighting is soft, highlighting her facial features.

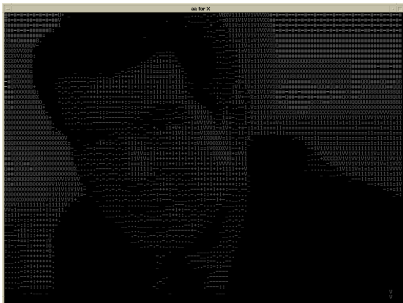
```

NNNNRRRNNRXXRRXXUYVIttttttIItiitttiiiiaii++++=====+iitttIYUXUYItIYXRMMWWWRUXXUYXXNW
NNNNNNRRRNNRXXUYVIttiii++tIii+++++iii+i++++=====+iitttttttttttIUXNMWWWNXXUYVIYRW
NNMMNNNNNNRXXUYVtiii++i++i++++=====;=====+iitttttttttttIUXNNNNNRXXUYIIR
MMMMNNNNNRXXUYItti++++=====+=====;=-+itIIYYVUYUYVIIttttIYUXRXXRRRXXUYI
MMMMNNNRXXUYItii++++=====;=====;+tIYUUUYUYVIYUYVYIIttttIYUYUYUYUXRRXUYI
MMMMNRXXUYItii++++=====;=====+iUXRXXUYVIIIIYUYUYIIttttttIYVUIIXRRNNRUIt
RRRRXUYViii++++=====;=====+tIUXRRRRRXXRRRNNNNNRXXUYti++iitttttIYUUYIUNNRXYIIX
UUYVYItii++++=====+IUXRRRRNNMMNNWWRNXXNMMMNRuti====+iittttIYUYUYNRUIIYV
RXXUYItti++++=====+itYXUUXMMY=YtXMMtY;tURRYt+=====+iitttIIIttUXXUIIIRW
XXXXXXXXXXXXXXXXXUYVIt++++=====+itIYIUXX+...+i;+iUXUII+=====+iitttIIItIYVYIIYVW
UUUUUXRRNNMMNNMMNNRUyti++++=====+itttiItti+;;+tIYIt++++=====+iitttIIttIXUitIt+IR
UXRRMWWWWU+XUYWUU++ii++++=====+i++++=====;=====+iitttIIIttIiUWWWWWR=
tIYXNMRI;,+tYVYt;+i=====;=-+i=====;=====;=====+iitttIIIttIiUWWWWWR
i++itIXRXYtItiii++++=====;=====;=====;=====+iitttIIIttttUWWWWWR
i+++++tIIIVItitii++++=====;=====;=====;=====+iittIIIttItixMWWNY=
iii+++++=====;=====;=====+iitttItttttYMXItt+YV
=i++++=====;=====;=====+iitttttttttINHXUYIIt+
.i++++=====;=====;=====+iitiittIIItttIXWRUtvti;
..iii+=====;=====;=====+iitiiaii+++++=====+iitiittIIIIItIUMNXt+U+
...=tii++++=====;=====+itiiaiiiti+++++iiiiiiitttttIIIIItIIIIYVUXXxiXX
...=tii++++=====+=====+iii++itYti+++++iiiiiiitttttttIYVUXMMtXNRXU
...;iii++++=====;=-+iitttIIIti+++++=====+iitiitttIYUURUNUNWWMNU
.....=tItiii+++++=====+i++++=itIYVYItii+++++=====+iittttIYVXXXMXW####WR
.....=tItiii+++++=====+iitiitttIYVItti+++++=====+iitttIYUXRRNNMUW####WR
.....,itItttttttttt+++++=====+iittt++i+++++iitiYVUXXI+=====+iitttIYXRRRNNXYtRW####WR
.....=tIttttiti+++++=====;=+tIIIIIIYVUUUY+=====+iitttIYXRRNNMWRNIIXMWUW
.....,tIttiii+++++=====+iitiitttitiYVYVYVYVYVYIYVt+++++=====+iittIYXRRNNMWNtYRUUNW
.....,itiii+++++iitiYVUUUYUYUYUYUYUYUYUYUYUYIIIIIIYVY+++++=====+iittIYXRRNNMWWMMI;+YV

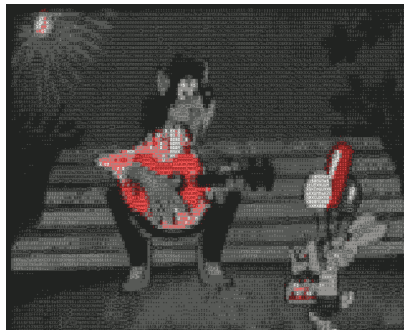
```

Video v ASCII

- Vyzkoušejte MPlayer ...



<http://www.mplayerhq.hu/>



<http://www.root.cz/clanky/mplayer-a-mencoder-hrajeme/>