

Wojciech REBAJN

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

Obrazy w stopniach szarości na drukarce laserowej

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę doboru macierzy roztrząsania dla potrzeb drukowania obrazów w stopniach szarości na drukarce laserowej. Roztrząsanie zakłada jednakowość kształtu pikseli czarnych i białych, co jest prawdziwe dla wyświetlaczy, a niezgodne z prawdą dla drukarek w szczególności laserowych. Mikroskopowy pomiar wielkości i kształtu pikseli oraz pomiary jasności klina szarości pozwalają na opracowanie nowych skorygowanych macierzy roztrząsania.

IMAGES EN NIVEAUX DE GRIS SUR IMPRIMANTE LASER

Résumé. L'article présente une méthode de choix de la matrice de tramage pour l'impression d'images en niveaux de gris sur une imprimante laser. Le tramage conventionnel présuppose l'identité de forme des pixels noirs et blancs, ce qui est vrai pour l'écran, mais qui n'est pas vrai pour les imprimantes, et en particulier, pour les imprimantes laser. Une mesure microscopique de la taille et de la forme des pixels, et une mesure de la clarté d'une cale en niveaux de gris permettent de créer des matrices de tramage corrigées.

GREYLEVEL IMAGES ON A LASER PRINTER

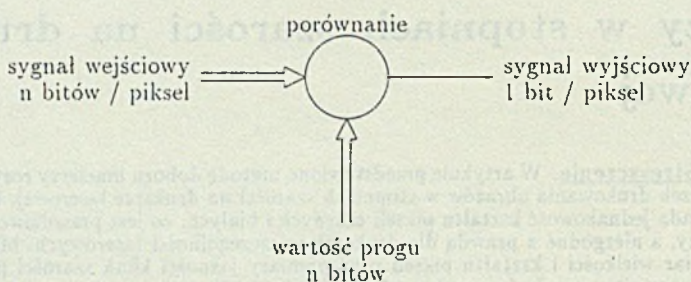
Summary. The article presents a method of choosing a dithering matrix to print greylevel images on a laser printer. Conventional dithering assumes same shape and size of black and white pixels, which is true for displays but not for printers, and in particular, laser printers. Microscopic measurement of pixel shape and size, and a measurement of the brightness of a greylevel wedge, enable us to design new, corrected dithering matrices.

1. Wstęp

Czarno-białe drukarki laserowe należą do grupy graficznych urządzeń wyjściowych, na których możliwe jest uzyskanie punktu grafiki tylko w dwóch barwach. Najczęściej są to kolory czarny i biały. W tej samej grupie znajdują się wszelkiego typu czarno-białe drukarki mozaikowe, kropelkowe, monitory plazmowe, karty grafiki typu hercules itp.

Subiektywny efekt ciągłości stopni szarości na tego typu urządzeniach wyjściowych osiągany jest przez sterowanie przestrzenną gęstością punktów dwustanowego nośnika.

Zasadniczy schemat procesu generacji obrazów pseudoanalogowych przedstawiony jest na rys. 1.



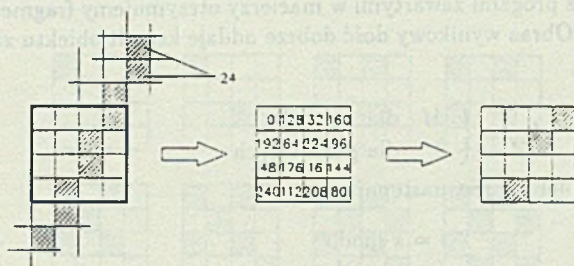
Rys. 1. Schemat zasady symulacji stopni szarości na dwubarwnym nośniku
Fig. 1. Schematic diagram of the greylevel simulation principle on a two-color medium

Jeśli intensywność piksela obrazu jest większa od progów, to odpowiedni punkt wyjściowy przyjmuje wartość maksymalną (jasny punkt). W przeciwnym wypadku dla wartości równej lub mniejszej od progów punkt wyjściowy otrzymuje wartość minimalną (punkt ciemny). Zasada ta prawdziwa jest zarówno dla sygnału wejściowego analogowego, jak i dyskretnego.

Istnieje wiele metod sterowania gęstością przestrzenną punktów na płaszczyźnie w celu uzyskania efektu ciągłości stopni szarości.

Najprostszą i najbardziej oczywistą metodą wydaje się być progowanie, tzn. podzielenie obrazu na obszary o jasności mniejszej i większej od stałego progów. Niestety metoda ta nadaje się jedynie do prezentacji dobrze oświetlonych scen binarnych.

Prostą modyfikacją progowania stałą wartością jest metoda progów losowanego. W tym przypadku wartość wejściową porównuje się z progiem losowanym z pewnego zakresu. W szczególnym przypadku może to być cały zakres jasności. I tu także jakość obrazu wyjściowego pozostawia wiele do życzenia, jakkolwiek w odróżnieniu od poprzedniej metody obraz wyjściowy oddaje wrażenie stopniowania jasności. Wynika to z uśredniających właściwości ludzkiego oka.



Rys. 2. Zasada tworzenia binarnego obrazu wynikowego metodą roztrząsania
 Fig. 2. The principle of creating a binary target image by dithering

Ponadto należy tu wymienić metody:

- makropiksela [6];
- progu dynamicznego [4];
- ograniczania średniej [1];
- minimalizacji błędu średniego [9];
- przetwarzania jasności na częstotliwość [8];
- roztrząsania [3].

1.1. Notacja

Obraz źródłowy zdefiniowany jest jako zbiór $X \times Y$ próbek ułożonych w prostokąt Y linii po X próbek w linii. Każda z $X \times Y$ próbek posiada intensywność I_{xy} skwantowaną na ośmiu bitach. Indeksy x, y oznaczają położenie w kolumnie i wierszu. Wartość $I_{xy} = 0$ reprezentuje czerń, a $I_{xy} = M$ biel, gdzie M jest wartością maksymalną (w poniższym artykule M przyjmuje wartość 255). L_{xy} wartość wyjściowa w punkcie x, y przyjmuje wartość 0 lub M .

1.2. Roztrząsanie

Najbardziej rozpowszechnioną i najczęściej stosowaną metodą jest roztrząsanie. Używana jest np. w kserokopiarkach i telefaxach [2].

Metoda roztrząsania generuje dwubarwny obraz ze źródła o tonacji ciąglej przez porównanie intensywności źródła I_{xy} w punkcie x, y z progiem D_{ij} zawartym w macierzy D o wymiarze $r \times s$ na pozycji i, j .

Zasadę tworzenia obrazu wynikowego przedstawia rys. 2. Fragment obrazu źródłowego zawiera linię o jasności $I = 24$ na tle o jasności $I = 243$. Po porównaniu punktów obrazu

leżących wewnątrz ramki z progami zawartymi w macierzy otrzymujemy fragment binarnego obrazu wynikowego. Obraz wynikowy dość dobrze oddaje kształt obiektu zawartego w obrazie źródłowym.

$$L_{xy} = \begin{cases} M & \text{dla } I_{xy} > D_{ij} \\ 0 & \text{dla pozostałych} \end{cases} \quad (1)$$

Element macierzy D_{ij} wybierany jest następująco:

$$\begin{aligned} i &= x \bmod r \\ j &= y \bmod s \end{aligned} \quad (2)$$

Reguły (1) i (2) powodują, że wzór macierzy D powtarzany jest na tle obrazu źródłowego tworząc teksturę. Kluczem metody roztrząsania jest odpowiedni dobór progów w macierzy. Cały zakres jasności ($0 \dots M$) podzielony jest na $rs + 1$ zazwyczaj równych przedziałów.

1.2.1. Roztrząsanie "uporządkowane"

Roztrząsanie uporządkowane (ang. ordered dither) zostało zastosowane już w 1969 w Bell Laboratories jako sposób na redukcję zjawiska konturowania w reprodukcjach obrazów telewizyjnych. Zastosowano tam macierze kwadratowe o progach rozłożonych pseudolosowo. Zasadę tworzenia macierzy progów podał w 1973 B.E.Bayer [3]:

$$D^2 = \begin{vmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$D^r = \begin{vmatrix} 4D^{r/2} + D_{00}^2 U^{r/2} & 4D^{r/2} + D_{01}^2 U^{r/2} \\ 4D^{r/2} + D_{10}^2 U^{r/2} & 4D^{r/2} + D_{11}^2 U^{r/2} \end{vmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

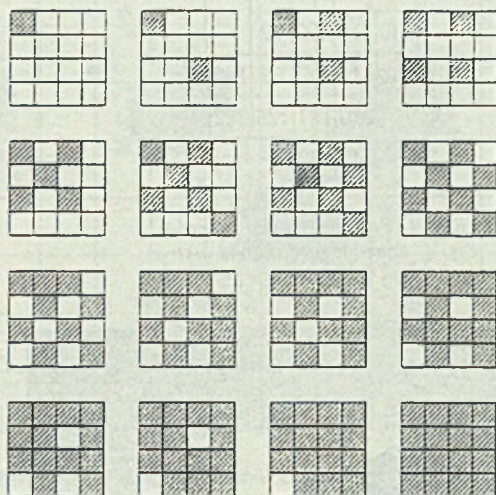
$$U^r = \begin{vmatrix} 1 & 1 \dots 1 \\ 1 & 1 \dots 1 \\ \vdots & \\ 1 & 1 \dots 1 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Macierz D^4 ma więc postać:

$$D^4 = \begin{vmatrix} 0 & 8 & 2 & 10 \\ 12 & 4 & 14 & 6 \\ 3 & 11 & 1 & 9 \\ 15 & 7 & 13 & 5 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Rysunek 3 przedstawia fragmenty obrazu wynikowego tworzonego za pomocą macierzy D^4 ze źródła o malejącej jasności (bez małych obiektów).

Jako kryterium optymalizacji przy tworzeniu macierzy Bayer przyjął minimalizację zakłóceń o niskiej częstotliwości przestrzennej. Oznacza to, że wzorce Bayera wprowadzają jak najmniej widoczną teksturę przy odtwarzaniu obrazów z małymi detalami i relatywnie stałą jasnością.



Rys. 3. Wzorki tworzone przez macierz D^4 (jasność malejąca)
 Fig. 3. Patterns produced by the D^4 matrix (in order of decreasing brightness)

Z zależności (3) do (6) wynika kilka własności.

- Macierz D^r daje $r^2 + 1$ stopni szarości.
- Wzrost r nie powoduje utraty rozdzielczości przestrzennej przy wzroście liczby stopni szarości.
- Z rekurencyjnej metody generacji macierzy wynika, że każda macierz D^r składa się z odpowiedniej kombinacji podmacierzy $aD^2 + bU^2$, gdzie współczynniki a i b zależą od rzędu macierzy D^r .

Najlepsze wyniki daje macierz D^8 . Mniejsze wzorki mają tendencję do uwidaczniania konturów, natomiast nie wnoszą niczego nowego. Teoretycznie zaprzecza to poprzednim wnioskom, lecz trzeba zauważyć, że macierz D^{16} zawiera w sobie 4 macierze D^8 różniące się o 1, podczas gdy zakłócenia przekraczają 4 jednostki intensywności.

1.2.2. Metoda "rosnącego punktu"

Metoda ta jest modyfikacją roztrząsania uporządkowanego. Zasada tworzenia obrazu wynikowego jest taka sama, lecz zastosowano inne wzorki. Rysunek 4 przedstawia kształt i zawartość przykładowego wzorca stosowanego w metodzie "rosnącego punktu"

Progi w macierzy zostały ułożone w taki sposób, aby średnica "kropki", powstającej w wyniku przyłożenia macierzy do wzorca, rosła odwrotnie proporcjonalnie do jasności źródła.

		167	200		
230	210	94	72		
153	111	36	52	193	
	216	181	126	222	
	242	232			

Rys. 4. Przykład matrycy progów
Fig. 4. Example of threshold matrix

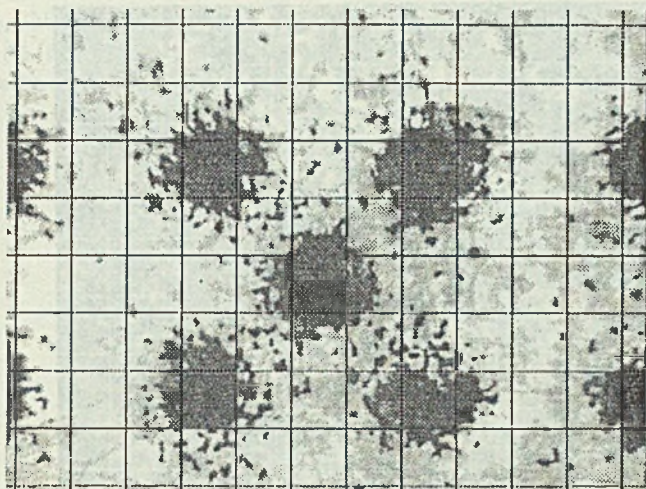


Rys. 5. Obraz sceny naturalnej - klinem szarości. Roztrzaskanie macierzą Bayera D^8
Fig. 5. Image of a natural scene with graylevel wedge inserted. Dithering with the D^8 Bayer matrix

2. Roztrzaskanie na drukarce laserowej

Roztrzaskanie uporządkowane na drukarce laserowej w rozdzielczości 12 mm^{-1} (300 DPI) nie daje jednak oczekiwanych rezultatów. Obraz z nałożonym klinem szarości wydrukowany za pomocą roztrzaskania uporządkowanego z wykorzystaniem macierzy D^8 ujawnia nieoczekiwane zaburzenia w kształtowaniu kolejnych stopni szarości.

Na rys. 5 można zauważyć, że dla intensywności źródła $M/2 = 127$ występuje zaciemnienie bliskie maksymalnemu. Ponadto dla jasności mniejszych od 127 nie ma już wrażenia płynnej zmiany stopni szarości.



Rys. 6. Pojedyncze piksele drukarki HP LaserJet III w powiększeniu 110x
 Fig. 6. Single pixels of a HP LaserJet III printer, magnification 110x

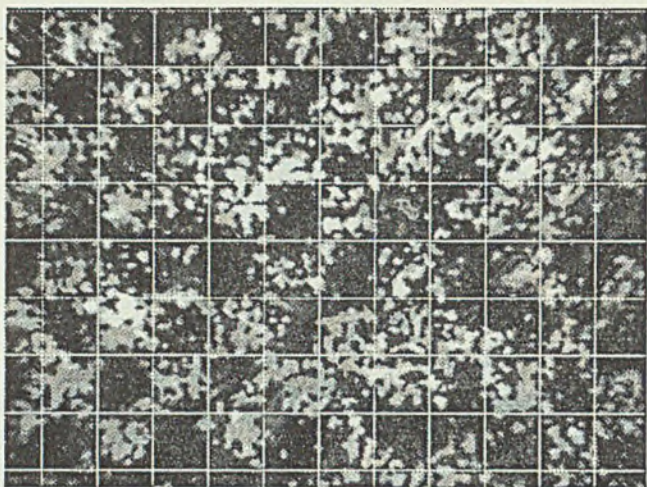
2.1. Specyfika drukarek laserowych na przykładzie HP LaserJet III

Opisane powyżej techniki kształtowania stopni szarości na dwustanowych graficznych urządzeniach wyjściowych charakteryzują się różną jakością w zależności od scen, jakie przedstawiają obrazy wejściowe. Skuteczność powyższych metod opiera się na założeniu, że piksel o minimalnej jasności zajmuje taki sam obszar jak piksel o maksymalnej jasności. Założenie to nie jest niestety prawdziwe dla drukarek laserowych w największej rozdzielczości.

Rysunek 6 przedstawia zdjęcie mikroskopowe pojedynczych czarnych pikseli wydrukowanych za pomocą drukarki HP LaserJet III.

Pojedyncze oczko siatki nałożonej na zdjęcie ma wymiar teoretycznego piksela drukarki laserowej. Piksel rzeczywisty pokrywa powierzchnię średnio o 190% większą od powierzchni teoretycznej.

Rys. 7 to zdjęcie mikroskopowe innego fragmentu tego samego wydruku co na rys. 6 i w tym samym powiększeniu. Powierzchnia zadrukowana jest tu pikselami ułożonymi w szachownicę, teoretycznie zaczerniona w 50% wykazuje zaczernienie średnio 80%. (Pomiarów dokonano analizatorem stereologicznym ASTER). Można zauważyć, że piksele skupione na rys. 7 wydają się być mniejsze niż pojedyncze piksele z rys. 6 mimo identycznego powiększenia. Jest to także cecha charakterystyczna dla drukarek laserowych. Gęstość toneru na krawędzi obszaru zaczernionego jest większa niż w jego wnętrzu mimo jednakowej teoretycznie gęstości pikseli.



Rys. 7. Piksele drukarki HP LaserJet III w powiększeniu 110x ułożone w szachownicę
 Fig. 7. Pixels of a HP LaserJet III printer arranged in a checkerboard pattern, magnification 110x

2.2. Dobór macierzy progów

Powyższe doświadczenia wykazują, że macierze Bayera nie nadają się do prawidłowego odzwierciedlenia gamy szarości na testowanej drukarce. Znacznie lepsze efekty można osiągnąć stosując roztrząsanie typu rosnącego punktu. Błędy wynikające z rozmycia pikseli kompensują się na granicach punktów sąsiadujących ze sobą.

Macierz typu rosnącego punktu zaproponował R.L.Grad [5]. Składa się ona z macierzy 4×4 powtarzanej naprzemiennie w lustrzanym odbiciu (rys. 8).

16	80	160	224	224	160	80	16
48	112	128	192	192	128	112	48
208	144	96	32	32	96	144	208
240	176	64	0	0	64	176	240
224	160	80	16	16	80	160	224
192	128	112	48	48	112	128	192
32	96	144	208	208	144	96	32
0	64	176	240	240	176	64	0

Rys. 8. Macierz Grada
 Fig. 8. The Grad matrix

Efekty roztrząsania za pomocą macierzy Grada możemy zobaczyć na rys. 11. Obraz z rys. 11 jest wyraźniej, niż przedstawiony na rys. 5 mimo występowania efektu konturowania. Macierz ta pozwala na uzyskanie 17 stopni szarości.

Matrycę, która odwzorowuje więcej stopni szarości, z 32 progami, podaje D.E.Knuth [6] (rys. 9). Matryca z rys. 9 po przeniesieniu do macierzy kwadratowej wygląda jak na rys. 10.

				248				
			152	184	216			
			112	56	88	120	136	
		208	80	16	24	40	168	232
240	176	48	0	8	72	200		
	144	96	64	32	104			
			192	160	128			
				224				

Rys. 9. Matryca Knutha
Fig. 9. The Knuth matrix

112	56	88	120	136	192	160	128	
80	16	24	40	168	232	224	208	
48	0	8	72	200	248	240	176	
96	64	32	104	152	184	216	144	
136	192	160	128	112	56	88	120	
168	232	224	208	80	16	24	40	
200	248	240	176	48	0	8	72	
152	184	216	144	96	64	32	104	

Rys. 10. Matryca Knutha po przeniesieniu do macierzy kwadratowej
Fig. 10. The Knuth matrix transferred to a square table

Zwiększenie liczby stopni szarości poprawia jakość obrazu wynikowego redukując efekt konturowania. Niestety zastosowanie macierzy 64-elementowej wprowadza już do obrazu zbyt duże zakłócenia spowodowane wielkością rastra.

2.3. Kształtowanie rozkładu stopni szarości

Obrazy 11 i 12 wydają się być dość dobrej jakości. Jednakże pomiary rozkładu stopni szarości wzdłuż klina szarości wygenerowanego za pomocą macierzy Grada czy D33 wykazują nieliniowość.

Nielinowość ta wynika ze wspomnianych wcześniej cech drukarek laserowych. Dla dużych jasności, kiedy punkt w rastrze jest mały, udział błędu rozchłapywania jest duży. Wraz ze wzrostem rozmiaru punktu w rastrze udział błędu rozchłapywania maleje, natomiast zaczyna ujawniać się własność rozjaśniania wnętrza litego obszaru czarnego. Stąd dla dużych i małych jasności gradient jasności jest większy niż teoretyczny, natomiast w centrum obserwujemy spłaszczenie odwzorowania.



Rys. 11. Obraz po roztrząsaniu macierzą Grada
 Fig. 11. Image dithered with the Grad matrix

Przy liniowym odwzorowaniu stopni szarości dla n progów jasności wynikowe modelują prostą o równaniu:

$$\frac{N+1}{N}x - \frac{M}{2N} = y \quad (7)$$

Liniowość wynikową można uzyskać stosując nieliniowy rozkład progów. Wartości pośrednie obliczamy z odwzorowania odwrotnego do (7):

$$x = \frac{N}{N+1}y + \frac{M}{2(N+1)} \quad (8)$$

i na ich podstawie obliczamy wartości progów w połowie odległości między tymi wartościami.

Porównując obrazy wynikowe otrzymane za pomocą prostej macierzy D33 z obrazem otrzymanym za pomocą macierzy D33 z kompensacją nieliniowości, można stwierdzić wzmocnienie kontrastu w zakresie średnich jasności, a więc tych najczęściej używanych.

3. Podsumowanie

Istnieje wiele metod symulacji stopni szarości na dwubarwnych graficznych urządzeniach wyjściowych. Efekt ciągłości stopni szarości osiągany jest przez zmianę przestrzennej gęstości ciemnych punktów (pikseli) obrazu (rys. 1). Najbardziej rozpowszechnioną metodą jest stosowane w kserokopiarkach i telefaxach roztrząsanie.



Rys. 12. Obraz po roztrząsaniu macierzą $D33$
Fig. 12. Image dithered with the $D33$ matrix



Rys. 13. Obraz po roztrząsaniu macierzą $D33$ z kompensacją nieliniowości
Fig. 13. Image dithered with the $D33$ matrix with nonlinearity compensation

Zasadę tworzenia obrazu wynikowego za pomocą roztrząsania przedstawia rys. 2. Ideą tej metody jest progowanie obrazu za pomocą zadanych progów zawartych w macyry roztrząsania. Obraz wynikowy powstaje przez porównanie obrazu oryginalnego z obrazem odniesienia o tym samym rozmiarze. Obraz odniesienia składa się z macyry roztrząsania rozłącznie pokrywających obszar równy powierzchni obrazu oryginalnego. Macyry roztrząsania mogą mieć różne kształty oraz w różny sposób mogą być określane wartości progowe (rys. 4). Podstawowym założeniem przyjmowanym w metodach określenia wartości progowych jest niezależność kształtu piksela od jego barwy (stopnia szarości), co w praktyce jest spełnione tylko z pewnym przybliżeniem. Mikroskopowe pomiary wielkości i kształtu pikseli drukarki laserowej HP Laser Jet w rozdzielczości 12 mm^{-1} (300 DPI) wykazują odchylenia rzeczywistej wielkości piksela czarnego od wielkości teoretycznej do 90% (rys. 6 i 7). W tych warunkach macyry tworzone z macyry Bayera [3] tworzą obrazy o bardzo zlej jakości - rys 5. Znacznie lepsze efekty można osiągnąć stosując macyry Grada [5] (11) lub Knutha [6] (12). Jednakże pomiary rozkładu stopni szarości wzdłuż klina szarości wygenerowanego za pomocą macyry Grada czy D33 wykazują nieliniowość. Nieliniowość ta wynika ze wspomnianych wcześniej cech drukarek laserowych. Dla dużych jasności, kiedy punkt w rastrze (tworzony przez złożenie sąsiednich pikseli) jest mały, udział błędu rozchłapywania jest duży. Wraz ze wzrostem rozmiaru punktu w rastrze udział błędu rozchłapywania maleje, natomiast zaczyna ujawniać się własność rozjaśniania wnętrza litego obszaru czarnego. W niniejszej pracy proponuje się, aby na podstawie zmierzonego rozkładu jasności wzdłuż klina szarości określić nieliniowość tego rozkładu, a następnie skompensować tę nieliniowość przez zmianę wartości progów w macyry roztrząsania, stosując nieliniowy podział przedziałów jasności wyznaczanych przez nowe progi.

LITERATURA

- [1] J.F.Jarvis, C.N.Judice, W.H.Ninke. *A survey of techniques for the display of continuous tone pictures on bilevel displays.*
Computer Graphics and Image Processing, vol. 5, 1976, 13-40.
- [2] D.Bodson, R.A.Schaphorst, S.J.Urban. *Gray scale pictures via group 3 facsimile.*
IEEE Commun. Magazine, 1989, 42-49.
- [3] B.E.Bayer. *An optimum method for two-level rendition of continuous-tone pictures.*
International Conference on Communications, Conference Record, 1973, (26-11)-(26-15).
- [4] T.H.Morrin. *A black-white representation of a grey scale picture.*
IEEE Trans. Computers C-23, 1974, 184-186.
- [5] R.L.Grad. *Digital picture processing techniques for the publishing industry.*
CGIP no.5, 1976, 151-171.
- [6] D.E.Knuth. *Fonts for Digital Halftones.*
TUGboat, vol. 8, 1987, no.2, 135-160.

- [7] R.C.Gonzalez, P.Wintz. *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publishing Company, 1987, 451-455.
- [8] L.Luchowski. *System analizy obrazów ASTER; metoda symulacji stopni szarości na urządzeniach graficznych*. Materiały II Wiosennej Szkoły PTI, 1990.
- [9] R.Floyd, L.Steinberg. *An adaptive algorithm for spatial grey scale*. SID Symposium. Digest of Papers, 1975, 36-37.
- [10] R.Ulichney. *Digital Halftoning*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London 1987.

Recenzent: Prof dr hab. inż Stanisław Kozielski

Wpłynęło do Redakcji dnia 31.08.92

Abstract

There exist many methods of graylevel simulation on two-level output devices. A continuous graylevel effect is obtained by varying spatial density of dark points in the image (Fig. 1). The most widespread method is dithering, used in photocopying and facsimile machines. The principle of dithering is presented in Fig. 2. Basically, the approach is to threshold the image with predefined thresholds contained in the dither matrix. The target image is created by comparing the original to a reference image of the same size. The reference image is composed of non-overlapping copies of the dither matrix, covering an area equal in size to the original image. The dither matrix may have various shapes, and the threshold values in it can be determined in various ways (Fig. 4). A basic assumption underlying most threshold patterns in use is that the shape of a pixel on the target device does not depend on its colour (graylevel). In practice, this is only approximately true. Microscopic measurement of the size and shape of pixels (dots) printed by a HP Laser Jet at 12 mm^{-1} (300 DPI) resolution show a difference of up to 90% between the actual size of a black dot and the area of the theoretical pixel grid square (Figs. 6 and 7). Under these circumstances, dither patterns based on the Bayer matrix [3] yield pictures of very poor quality. Much better results can be obtained using Grad matrices [5] (11) or Knuth matrices [6] (12). However, measurements of graylevel distribution in a graylevel wedge generated with Grad or D33 matrix show a non-linearity. This is due to the laser printer characteristics mentioned above. In bright areas, where the raster point (made up of several printer dots) is small, the splasharound error is a significant percentage of the area. As the raster point becomes larger, the relative importance of the splasharound error decreases, while another effect becomes visible, namely, that of brightening the interiors of solid black areas. The present article suggests that the graylevel distribution along a printed graylevel wedge be measured, and the results be used to adjust thresholds in the dither matrix, creating a nonlinear spacing of graylevel intervals to compensate the nonlinearity of the printer.