Liet. matem. rink., T. 40, spec. nr., 443–449

Dimensiškumo keitimu pagrįstas dvimačių „siluetinių“ vaizdų kodavimas

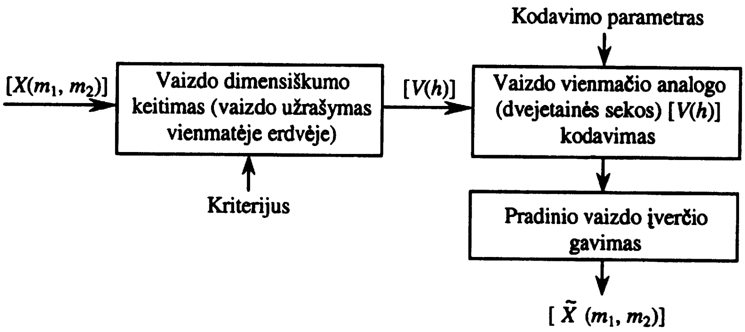
Jonas VALANTINAS (KTU)
el. paštas: jonas.valantinas@mfm.ktu.lt

Įvadas

Ne paslaptis, jog vieni skaitmeninio vaizdų apdorojimo (kodavimo) metodai yra pakankamai efektyvūs daugiamačiams vaizdams ir mažiau efektyvūs vienmačiu atveju, bei atvirkščiai. Pavyzdžiui, hiperbolinių filtrų darbo efektyvumą tiesiogiai veikia apdorojamų vaizdų dimensiškumas, t.y. kuo didesnis vaizdo matavimų skaičius, tuo geriau „dirba“ hiperbolinis filtras, [1]. Ir atvirkščiai, algoritmų, orientuotų į dvejetainių vaizdų apdorojimą, gausa ir darbo efektyvumas stipriau pasireiškia vienmačiu atveju [2, 3].

Tad kodėl nepakeitus vaizdo dimensiškumo, prieš taikant jam vieną ar kitą kodavimo algoritmą? Be abejo, reikalingi kriterijai, užtikrinantys tokio keitimo tikslingumą. Patirtis sako, jog vienas iš galimų kriterijų – vaizdo glodumas. Pakanka apibrėžti problemiškai orientuotas vaizdo skenavimo procedūras (pikselių nuskaitymo trajektorijas) tokias, kad kitokio matavimo erdvėje užrašytas vaizdas būtų kaip galima glodesnis. Paprastai, nespalvotų (su pilka intensyvumo skale) vaizdų glodumą apsprendžia jų dažnuminis turinys, t.y. kuo greičiau „gęsta“ vaizdą sudarančios aukštesnių dažnių harmonikos, tuo glodesnis vaizdas [4]. Dvejetainių vaizdų atveju, glodumas interpretuojamas šiek tiek kitaip, būtent: vienmatis dvejetainis vaizdas (dvejetainė seka) tuo glodesnis, kuo mažesnis perėjimų nuo „0“-kų prie „1“-kų (ir atvirkščiai) skaičiaus ir sekos elementų skaičiaus santykis, t.y. kuo didesni vaizdą sudarantys ir iš eilės einantys „1“-kų („0“-kų) blokai. Panašiai, dvimačio dvejetainio vaizdo glodumas apibūdinamas vaizdo fragmentų, užpildytų vien „1“-kais („0“-kais), dydžiu bei skaičiumi.

Straipsnyje pateikiamas naujas dvimačių dvejetainių („siluetinių“) vaizdų efektyvaus kodavimo metodas, pagrįstas vaizdo dimensiškumo keitimu, t.y. jo užrašymu vienmatėje erdvėje, ir nuosekliu maksimalaus dydžio (ilgio) „1“-kų („0“-kų) blokų pašalinimu iš gautojo vienmačio vaizdo analogo. Bendra blokinė sudaryto metodo schema parodyta 1 pav. Panaudoti žymėjimai: $[X(m_1, m_2)]$ – pradinis dvimatis dvejetainis („siluetinis“) vaizdas; $X(m_1,m_2) \in \{0,1\}$, $m_1, m_2 = 0,1,\ldots,N-1$, $N = 2^n$, $n \in \mathbb{N}$; $[V(h)]$ – pradinio vaizdo vienmatis analogas (dvejetainė seka); $V(h) \in \{0,1\}$, $h = 1,2,\ldots,N^2$; $[\widetilde{X}(m_1,m_2)]$ – pradinio vaizdo įvertis; priklausomai nuo kodavimo parametro reikšmės, dvejetainės sekos $[V(h)]$ kodavimas gali būti atliekamas dviem būdais – prarandant dalį informacijos ir neprarandant jos; pastaruoju atveju, vaizdo įvertis $[\widetilde{X}(m_1,m_2)]$ sutampa su pradiniu vaizdu $[X(m_1,m_2)]$.



1 pav. Bendra dvimačių „siluetinių“ vaizdų efektyvaus kodavimo schema.

Vaizdo dimensiškumo keitimas

Dvimatį vaizdą $[X(m_1, m_2)]$, $m_1, m_2 = 0, 1, \ldots, N-1$, užrašyti vienmatėje erdvėje galima įvairiais būdais – parenkant vieną ar kitą vaizdo nuskaitymo trajektoriją („eilutė po eilutės“, „stulpelis po stulpelio“, „spiralė“, ir panašiai). Kadangi vaizdo dimensiškumo keitimas siejamas su efektyviu jo kodavimu, tai tokio keitimo kriterijumi, kaip jau buvo užsiminta anksčiau, turėtų būti imamas vaizdo glodumas. Kalbant apie dvimačius „siluetinius“ vaizdus, maksimalų glodumo išsaugojimą užtikrina Hilberto kreivių (D. Hilbertas, 1890) taikymas.

Hilberto kreivės – tai erdvę užpildančios kreivės. Bet kurio laipsnio Hilberto kreivę galima sukonstruoti, panaudojant sumažintas atitinkamai pasuktas žemesnių laipsnių Hilberto kreives, bei įvertinant pastarųjų kreivių tarpusavio sujungimus (poslinkius) (2 pav.).

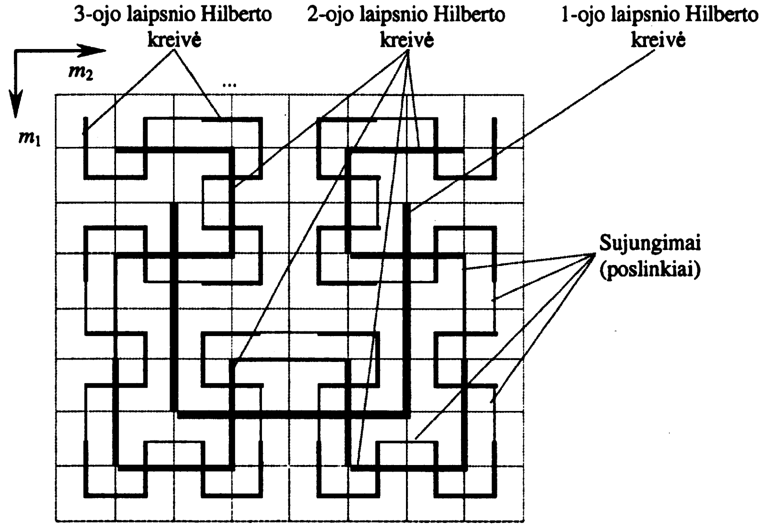
Pastebėsime, kad 1-ojo laipsnio Hilberto kreivė apibrėžia trajektoriją, pagal kurią gali būti nuskaitomas vaizdas (2×2), 2-ojo laipsnio Hilberto kreivė – vaizdas (4×4), ir, pagaliau, n-ojo laipsnio Hilberto kreivė – vaizdas $(2^n \times 2^n)$.

Labai svarbi Hilberto kreivių savybė yra ta, kad šalia esantys dvimačio vaizdo elementai (pikseliai) po nuskaitymo „užima“ gretimas pozicijas suformuotoje dvejetainėje sekoje. Tai leidžia kalbėti apie glodumo išsaugojimą, užrašant pradinį vaizdą vienmatėje erdvėje.

Žemiau pateikiamas sudarytas dvimačio vaizdo $[X(m_1, m_2)]$, $m_1, m_2 = 0, 1, \ldots, N-1$, $N = 2^n$, $n \in \mathbb{N}$, dimensiškumo keitimo algoritmas. Dvimatis vaizdas užrašomas vienmatėje erdvėje, vaizdo nuskaitymui panaudojant n-ojo laipsnio Hilberto kreivę (trajektoriją). Paties algoritmo veikimas remiasi 1 lentelėje koncentruotai pateikta informacija apie Hilberto kreives; vaizdo elementų (pikselių) indeksavimas ir Hilberto kreivių orientacija parinkti taip, kaip parodyta 2 pav.

Algoritmas (Vaizdo dimensiškumo keitimas)

1. Formuojamas n-matis vektorius $H = (H(1), H(2), \ldots, H(n))$; čia $H(1) = H^{(i_1)}$, $i_1 \in \{1, 2, \ldots, 8\}$, nusako pradinio vaizdo $[X(m_1, m_2)]$ elementų (pikselių) nuskaitymo trajektorijos „įėjimo“ ir „išėjimo“ taškus (mūsų atveju, $i_1 = 1$); $H(s) = H^{(i_s)} = H^{(i_s - 1)}(j_{s-1})$, $i_s \in \{1, 2, \ldots, 8\}$, $j_{s-1} \in \{1, 2, 3, 4\}$, $s = 2, 3, \ldots, n$; pradiniu momentu, $j_{s-1} = 1$, su visais $s = 2, 3, \ldots, n$.



2 pav. 3-ojo laipsnio Hilberto kreivės konstravimas, panaudojant žemesnių laipsnių Hilberto kreives.

2. $m_1 := m_2 := 0$; $h := 1$; $s := n$; $k := 1$.

3. Panaudojant 1-ojo laipsnio Hilberto kreivę $H(s) = H^{(i_s)} = H^{(i_s - 1)}(j_{s-1})$, nuosekliai nuskaitomas (užrašomas vienmatėje erdvėje) eilinis pradinio vaizdo $[X(m_1, m_2)]$ fragmentas (2×2), t.y. $V(h) := X(m_1, m_2)$;

$$\begin{aligned}\forall k(k = 1, 2, 3):\ & m_1 := m_1 + \delta_{1,k}^{(i_s)}, \quad m_2 := m_2 + \delta_{2,k}^{(i_s)}, \quad h := h + k,\\ & V(h) := X(m_1, m_2).\end{aligned}$$

4. Fiksuojama maksimali indekso s ($s \in \{2, 3, \ldots, n\}$) reikšmė, su kuria $j_{s-1} < 4$; jeigu tokios reikšmės nėra, t.y. $j_{s-1} = 4$, su visais $s = 2, 3, \ldots, n$, tai pereinama prie 6 žingsnio.

5. Atsižvelgiant į sujungimus tarp 1-ojo laipsnio Hilberto kreivių, apskaičiuojamos naujos vaizdo elemento (pikselio) indeksų reikšmės:

$$\begin{aligned}& m_1 := m_1 + \delta_{1,j_{s-1}}^{(i_s - 1)},\ m_2 := m_2 + \delta_{2,j_{s-1}}^{(i_s - 1)},\\ & j_{s-1} := j_{s-1} + 1,\ j_s := j_{s+1} := \cdots j_{n-1} := 1.\end{aligned}$$

Koreguojamas vektorius H. Pereinama prie 3 žingsnio.

6. Pabaiga. Vaizdo $[X(m_1, m_2)]$ vienmatis analogas (dvejetainė seka $[V(h)]$) suformuotas.

Pastebėsime, jog išsaugant tą pačią pradinio vaizdo elementų indeksavimo tvarką, galima nesunkiai realizuoti vaizdo nuskaitymo atvejus, kai n-mačio vektoriaus H pirmoji komponentė $H(1) = H^{(i_1)}$, $i_1 \in \{2, 3, \ldots, 8\}$. Tam reikia nežymiai pakeisti 1 lentelės turinį (sujungimų tarp 1-ojo laipsnio Hilberto kreivių aprašus) ir fiksuoti kitas (nenulines!) pradines indeksų m_1 ir m_2 reikšmes (antrasis algoritmo žingsnis).

1 lentelė

Indek-sas i	1-ojo laipsnio Hilberto kreivė (rodyklė žymi kreivės apėjimo kryptį) $H^{(i)}$	2-ojo laipsnio Hilberto kreivės konstravimas $(H^{(i)}(1), H^{(i)}(2), H^{(i)}(3), H^{(i)}(4))$	Sujungimai (poslinkiai) tarp 1-ojo laipsnio Hilberto kreivių $H^{(i)}(j)$ ir $H^{(i)}(j+1)$, $j = 1, 2, 3$ $\left(\delta_{1,j}^{(i)}, \delta_{2,j}^{(i)}\right)$
1		$(H^{(4)}, H^{(1)}, H^{(1)}, H^{(8)})$	{(1,0), (0,1), (-1,0)}
2		$(H^{(7)}, H^{(2)}, H^{(2)}, H^{(3)})$	{(1,0), (0,-1), (-1,0)}
3		$(H^{(6)}, H^{(3)}, H^{(3)}, H^{(2)})$	{(0,1), (-1,0), (0,-1)}
4		$(H^{(1)}, H^{(4)}, H^{(4)}, H^{(5)})$	{(0,1), (1,0), (0,-1)}
5		$(H^{(8)}, H^{(5)}, H^{(5)}, H^{(4)})$	{(-1,0), (0,-1), (1,0)}
6		$(H^{(3)}, H^{(6)}, H^{(6)}, H^{(7)})$	{(-1,0), (0,1), (1,0)}
7		$(H^{(2)}, H^{(7)}, H^{(7)}, H^{(6)})$	{(0,-1), (1,0), (0,1)}
8		$(H^{(5)}, H^{(8)}, H^{(8)}, H^{(1)})$	{(0,-1), (-1,0), (0,1)}

Dvejetainės sekos (vaizdo vienmačio analogo) kodavimas

Dvejetainės sekos $[V(h)]$, $h = 1, 2, \ldots, N^2$, atitinkančios dvimatį „siluetinį“ vaizdą $[X(m_1, m_2)]$, $m_1, m_2 = 0, 1, \ldots, N-1$, formavimo procedūra leidžia daryti prielaidą, jog šią seką sudaro pakankamai dideli iš eilės einančių „1“-kų („0“-kų) blokai. Būtent šia prielaida ir yra pagrįsta siūloma dvejetainės informacijos (sekos $[V(h)]$) kodavimo procedūra.

Pažymėkime vienas po kito einančių (sekoje $[V(h)]$) „1“-kų ir „0“-kų blokus $B_1, B_2, \ldots, B_K$, o jų dydžius (ilgius, išreikštus bitais) – atitinkamai $l_1, l_2, \ldots, l_K$, $1 \leqslant K \leqslant N^2$. Siūlomos kodavimo procedūros esmę sudaro nuoseklus maksimalaus ilgio blokų pašalinimas iš rinkinio $\{B_1, B_2, \ldots, B_K\}$ ir informacijos apie pašalintųjų blokų ilgius bei jų lokalizavimą apdorojamoje dvejetainėje sekoje išsaugojimas. Pateikiame detalesnį šios procedūros aprašą.

Procedūra (Dvejetainės sekos kodavimas)

1. Dvejetainėje sekoje $[V(h)]$, $h = 1, 2, \ldots, N^2$, fiksuojamas maksimalaus ilgio „1“-kų (arba „0“-kų) blokas B_j ($j \in \{1, 2, \ldots, K\}$), t.y. $l_j = \max_{1 \leqslant i \leqslant K} \{l_i\}$.

Jeigu leistinas nežymus informacijos praradimas kodavimo metu, tai bloką B_j bandoma „sustambinti“, apjungiant jį su greta esančiais blokais. Galimi trys apjungimo atvejai, būtent:

- $B_{j-2}B_{j-1}B_j = B_j'$, jeigu $l_{j-1}/\left(l_{j-2} + l_{j-1} + l_j\right) \leqslant \varepsilon_0$; arba
- $B_j B_{j+1} B_{j+2} = B_j'$, jeigu $l_{j+1}/\left(l_j + l_{j+1} + l_{j+2}\right) \leqslant \varepsilon_0$; arba

- $B_{j-2}B_{j-1}B_jB_{j+1}B_{j+2} = B'_j$, jeigu $\left(l_{j-1} + l_{j+1}\right)/\left(l_{j-2} + l_{j-1} + l_j + l_{j+1} + l_{j+2}\right) \leqslant \varepsilon_0$;

čia: B'_j – naujai suformuotas blokas; (ε_0 – kodavimo parametras, t.y. leistinas apdorojamos informacijos iškraipymo laipsnis (paprastai, $\varepsilon_0 = 0 - 0,05$).

Pasirenkamas tas iš trijų išvardytų atvejų, kuris maksimizuoja naujai suformuoto bloko B'_j ilgį l'_j; jeigu kodavimo parametras $\varepsilon_0 = 0$, blokų apjungimas nėra atliekamas, t.y. koduojama neprarandant informacijos.

2. Tikrinamas išrinktojo maksimalaus ilgio bloko B'_j (arba B_j, jeigu blokų apjungimas nebuvo atliekamas) pašalinimo iš apdorojamos dvejetainės sekos tikslingumas. Blokas šalinamas, jeigu pirminės informacijos apie bloko dydį ir jo lokalizavimą sekoje išsaugojimui reikalingų bitų skaičius mažesnis už l'_j (arba l_j), t.y. jeigu

$$[2\log_2 N] + q_j + 2 < l'_j; \quad q_j = [\log_2 (n - l'_j + 1)] + 1, \quad n = l'_j + \sum_{i=1(i\notin I_j)}^{K} l_i; \quad (1)$$

čia I_j žymi vieną iš aibių – $\{j-2, j-1, j\}$, $\{j, j+1, j+2\}$, $\{j-2, j-1, j, j+1, j+2\}$, arba, tiesiog, $I_j = \{j\}$, kai blokas B_j nėra „stambinamas“; $[x]$ atitinka sveikąją skaičiaus x dalį.

Išsaugoma informacija apie pašalintąjį bloką B'_j – bloko turinį charakterizuojantis parametras $t_j (t_j = 0$, jeigu blokas sudarytas iš „0“-kų, ir $t_j = 1$, priešingu atveju), bloko dydis l'_j (šiai reikšmei išsaugoti preliminariai skiriama $[2\log_2 N]$ bitų) ir bloko poziciją apdorojamoje dvejetainėje sekoje nusakantis skaičius p_j (jam skiriama q_j bitų).

3. 1 ir 2 procedūros etapai kartojami tol, kol išpildoma (1) sąlyga, kiekvieną kartą naujai apibrėžiant apdorojamos dvejetainės sekos ilgį bei ją sudarančių (dar nepašalintų!) blokų skaičių.

4. Atliekamas preliminariai skirtos atminties (bitais) pašalintųjų blokų $B'_{j_1}, B'_{j_2}, \dots, B'_{j_M}$ $(M \leqslant K)$ ilgiams saugoti minimizavimas. Parenkamas skaičius r $(1 \leqslant r \leqslant 2\log_2 N)$, suteikiantis išraiškai

$$R = R(r) = \sum_{s=1}^{M} r \cdot \gamma_{j_s}(r) = r \cdot \sum_{s=1}^{M} \gamma_{j_s}(r)$$

minimalią reikšmę ($R_{\min}$); čia $\gamma_{j_s}(r)$ yra mažiausias sveikasis skaičius toks, kad $\gamma_{j_s}(r) \cdot (2^r - 1) \geqslant l'_{j_s}$, $s = 1, 2, \dots, M$.

Bendras saugomos informacijos apie dvejetainę seką $[V(h)]$, $h = 1, 2, \dots, N^2$, kiekis (bitais) Q yra lygus

$$Q = R_{\min} + M + \sum_{s=1}^{M} q_{j_s} + l_{pos.};$$

čia $l_{pos.}$ žymi posekio $[V_{pos.}]$, gauto iš pradinės dvejetainės sekos $[V(h)]$ pašalinus maksimalaus ilgio blokus B'_{j_s}, $s = 1, 2, \dots, M$, dydį (bitais); atskiru atveju, posekio $[V_{pos.}]$

kodavimui ($l_{pos.}$ minimizavimui) galima panaudoti entropinį kodavimą. Taigi, dvejetainės informacijos (tuo pačiu, ir pradinio vaizdo $[X(m_1, m_2)]$) suspaudimo laipsnis $\alpha = N^2/Q$.

Pradinio vaizdo įverčio gavimas

Dvimačio „siluetinio" vaizdo $[X(m_1, m_2)]$ atkūrimas (arba, vaizdo įverčio $[\widetilde{X}(m_1, m_2)]$ gavimas) atliekamas, prisilaikant tokios veiksmų tvarkos.

1. Dekoduojamas posekis $[V_{pos.}]$, jeigu jo saugojimui papildomai buvo taikomas entropinis kodavimas.

2. Laikantis principo „pirmas įėjo, paskutinis išėjo", visi pašalintieji blokai B'_{j_s}, $s = 1, 2, \ldots, M$, vienas po kito įterpiami į posekį $[V_{pos.}]$, t.y. dekoduojama saugoma informacija $\{t_{j_s}, l'_{j_s}, p_{j_s}\}$, $s = 1, 2, \ldots, M$. Pastebėsime, jog tam reikia iš naujo apskaičiuoti įterpiamų blokų pozicijas sekoje nusakančias reikšmes q_{j_s}, $s = 1, 2, \ldots, M$:

$$
\begin{aligned}
q_{j_M} &= \left[\log_2 l_{pos.}\right] + 1 \quad (q_{j_M} = 0, \quad \text{kai } l_{pos.} = 0),\\
q_{j_{M-1}} &= \left[\log_2\Big(\big(\gamma_{j_M}(r) - 1\big)(2^r - 1) + x_{j_M} + l_{pos.}\Big)\right] + 1,\\
q_{j_{M-2}} &= \Big[\log_2\Big(\big(\gamma_{j_M}(r) + \gamma_{j_{M-1}}(r) - 2\big)(2^r - 1) + x_{j_M}\\
&\qquad + x_{j_{M-1}} + l_{pos.}\Big)\Big] + 1;\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
q_{j_1} &= \Big[\log_2\Big(\big(\gamma_{j_M}(r) + \gamma_{j_{M-1}}(r) + \cdots + \gamma_{j_2}(r) - M + 1\big)(2^r - 1)\\
&\qquad + x_{j_M} + x_{j_{M-1}} + \cdots + x_{j_2} + l_{pos.}\Big)\Big] + 1,
\end{aligned}
$$

čia $x_{j_s} (s = 2, 3, \ldots, M)$ yra bloko B'_{j_s} ilgiui l'_{j_s} koduoti skirtų r „vyriausiųjų" bitų dešimtainis ekvivalentas.

3. Atkurta dvejetainė seka $[V(h)]$ (jos įvertis $[\widetilde{V}(h)]$), $h = 1, 2, \ldots, N^2$, užrašoma dvimatėje erdvėje, panaudojant tos pačios orientacijos n-ojo laipsnio Hilberto kreivę (trajektoriją).

Aprašytasis dvimačių „siluetinių" vaizdų kodavimo metodas realizuotas programiškai (Matematikos mokslo magistras K. Slankauskas, KTU). Gauti eksperimento rezultatai leidžia teigti, jog siūlomas metodas yra efektyvesnis už kitus analogiškus šiuo metu praktikoje taikomus metodus (GIF, BMP ir pan.).

Išvados

Vaizdo dimensiškumo keitimas – gera priemonė, siekiant padidinti vieno ar kito skaitmeninio duomenų apdorojimo algoritmo efektyvumą. Antra vertus, nereikia pamiršti, kad duotojo vaizdo užrašymas kitokio matavimo erdvėje turi būti atliekamas, atsižvelgiant į su šiuo veiksmu susijusių tolimesnių procedūrų pobūdį – būtent nuo jų priklauso dimensiškumo keitimo kriterijų parinkimas. Tie kriterijai gali būti labai specifiniai, jeigu vaizdo apdorojimas nėra siejamas su jo efektyviu kodavimu.

Straipsnyje pateiktas dvejetainių vaizdų kodavimo metodas gerai tinka „siluetiniams" vaizdams. Dvejetainių „tekstinių" vaizdų, pasižyminčių kur kas mažesniu glodumu, atveju, siūlomų procedūrų efektyvumas krenta, todėl tikslingiau būtų pasirinkti arba kitokį (ne Hilberto kreives!) vaizdinės informacijos nuskaitymo būdą, arba vaizdo kodavimui taikyti kitus, galbūt, mažiau efektyvius metodus.

Literatūra

[1] J. Valantinas, A new approach to hyperbolic filtering of gray-level images, *Information Technology and Control*, 1(7), 35–42 (1998).
[2] Karel Culik II, Vl. Valenta, Finite automata based compression of Bi-level and simple color images, *Proc. Data Compression Conference*, Snowbird, Utah (1996).
[3] *Imaging on the Internet: Scientific/Industrial Resources* (1998).
[4] J. Valantinas, N. Morkevičius, Smoothness analysis of two-dimensional gray-level images, *Information Technology and Control*, 1(14), 15–24 (2000).

Image dimensionality change based coding of two-dimensional "silhouette" images

J. Valantinas

In this paper we present a new coding scheme for two-dimensional "silhouette" images. In order to get higher compression rates, appropriately chosen Hilbert curves are applied to change dimensionality of the images.