

Insulto srities atpažinimo kompiuterinėse tomogramose algoritmų efektyvumo palyginimas*

Aleksandras KRYLOVAS (VGTU), Andrius UŠINSKAS (VGTU)
Virginija GAIGALAITĖ (VU)
el. paštas: akr@fm.vtu.lt, au@el.vtu.lt

1. Šis tyrimas atliekamas, kaip dalis ciklo darbų, skirtų išeminio insulto atpažinimo kompiuterinėse tomogramose (CT) automatizavimui [1, 2]. Pagal nustatytus įvairiais metodais insulto srities kontūrus atskiruose CT sluoksniuose reikia rekonstruoti erdvinį šios srities vaizdą ir įvertinti jos tūrį. Insulto srities kontūras ir jos plotas atskirame sluoksnyje apskaičiuojamas su tam tikra paklaida. Todėl rekonstrukcijos uždavinys irgi gali būti išspręstas tik apytiksliai. Tokio sprendinio tinkamumo kriterijai nustatyti galima remtis ekspertų medikų nuomone apie insulto srities tūrį, vertinant, pavyzdžiui, klinikiškus požymius arba patologo anatomo išvadas. Kadangi tokie ekspertų įverčiai nėra labai tikslūs, reikalingas specifinis matematinis modeliavimo aparatas.

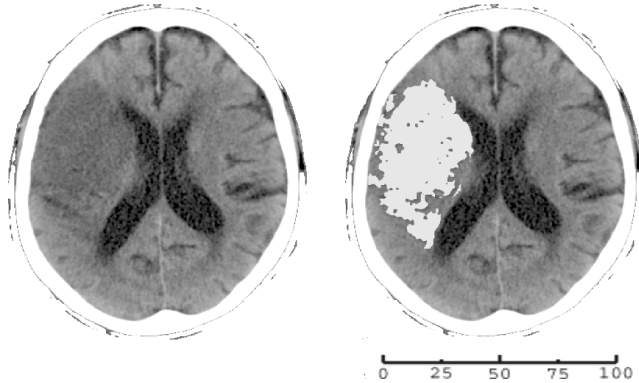
Matematinės statistikos metodai paprastai taikomi, kai matavimo tikslumą galima garantuoti, atliekant daug matavimų. Kiekvieno insulto srities atvejis yra unikalus, o gaunamų atskirais metodais įverčių tikslumas yra nedidelis. Todėl šiuo atveju netaikytini standartiniai metrologijos principai.

Panašios problemos dažnai sprendžiamos ekspertinių įverčių metodais. Svarbus šių metodų taikymo aspektas yra priimtina ekspertams informacijos pateikimo forma. Tokios formos parinkimas yra vienas išsprendžiamų, vykdamas šį darbų ciklą, uždavinių.

Minėto netikslumo prigimtis slypi pačios insulto srities kompiuterinėje tomogramoje sąvokoje. Vykdamas šį darbą, buvo atlikti eksperimentai, kai kvalifikuoti ekspertai medikai turėjo įvertinti, kaip apdorota tam tikru algoritmu tomograma atitinka tikrąjį insulto vaizdą. Ekspertas žymėjo nubraižytoje liniuotėje atitinkama vietą (nuo visai neatitinka – 0 iki visiškai atitinka – 100; žr. 1 pav.). Kadangi ekspertas matė ne tik apdorotą, bet ir pradinę tomogramą (1 pav. kairėje pusėje), pakankamai dažni nuomonių skirtumai gali liudyti tam tikrą pačios insulto srities nustatymo sudėtingumą.

Mes konstruojame įvairių CT apdorojimo metodų efektyvumo palyginimo matematinę modelį, kuris leidžia panaudoti ekspertų įverčių informaciją ir kiekvienam metodui nustatyti, kad jis 1) visiškai tinkamas, arba 2) visiškai netinkamas, arba 3) jo tinkamumą įvertinti tam tikru laipsniu nuo 0 iki 1.

*Šis darbas atliekamas pagal EUREKA programą (projektas CTBSTROKE E!2981) ir yra remiamas Lietuvos valstybinio mokslo ir studijų fondo (sutarties Nr. V-5/05 04 18, reg. Nr. V-05038).



1 pav. Pradinė tomograma ir ta pati apdorota tomograma su vertinimo skale.

2. Šiame straipsnyje siūloma žiūrėti į insulto sritį kaip į tam tikrą abstrakciją (konstrukta) ir eksperto uždavinys – įvertinti informaciją, gaunama iš kiekvieno pjūvio, vertinant ne tik hipotetinės insulto srities plotą, bet ir jos pavidalą, išdėstymą ir pan. Taigi pavaizduotas 1 pav. CT apdorojimo rezultatas turi būti įvertintas suteikiamos apie insultą informacijos vertingumo prasme.

Uždaviniui spręsti buvo pasirinktas neryškių aibių aparatas. Tai, palyginus nauja matematinė kryptis, pasiūlyta [3]. Šios teorijos idėja – apibrėžti neryškų elemento a priklausomumą aibei A . Tarkime, kad $0 \leq \varphi_A(x) \leq 1$ yra aibės A charakteristinė funkcija. Kai

$$\varphi_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{kai } x \in A, \\ 0, & \text{kai } x \notin A, \end{cases}$$

turime klasikinę (ryškia) aibę. Kai $\varphi_A(a) > 0$ ir $\varphi_A(a) < 1$, gauname tam tikrą elemento a priklausomumo aibei A laipsnį. Charakteristines funkcijas galima apibrėžti įvairiais būdais. Veiksmams skaičių tiesėje atliki dažnai taikomi $L - R$ neryškūs skaičiai [4]. Mes pasirinkome atkarpomis tiesinį $L - R$ skaičių modelį – trapecinius skaičius. Jie apibrėžiami tokia charakteristine funkcija ($\alpha \leq a \leq b \leq \beta$):

$$\varphi(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } t \leq \alpha \text{ arba } t \geq \beta, \\ \frac{t-\alpha}{a-\alpha}, & \text{kai } \alpha < t < a, \\ 1, & \text{kai } a \leq t \leq b, \\ \frac{t-\beta}{b-\beta}, & \text{kai } b < t < \beta. \end{cases}$$

Taigi tiksliai apibrėžtą skaičių x galima iš reikšti trapeciniu skaičiumi (x, x, x, x) . Intervalas $(x - \varepsilon, x + \varepsilon)$ apibrėžiamas taip: $(x - \varepsilon, x - \varepsilon, x + \varepsilon, x + \varepsilon)$.

Dviejų trapecinių skaičių $(\alpha_1, a_1, b_1, \beta_1)$ ir $(\alpha_2, a_2, b_2, \beta_2)$ suma apibrėžiama, kaip toks trapecinis skaičius:

$$(\alpha_1 + \alpha_2, a_1 + a_2, b_1 + b_2, \beta_1 + \beta_2).$$

Tada insulto srities tūrį galima išreikšti trapeciniu skaičiumi ($V_\alpha, V_a, V_b, V_\beta$). Čia

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_a \\ V_b \\ V_\beta \end{pmatrix} = \frac{h}{2} \left(\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ a_1 \\ b_1 \\ \beta_1 \end{pmatrix} + 2 \sum_{i=2}^{N-1} \begin{pmatrix} \alpha_i \\ a_i \\ b_i \\ \beta_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha_N \\ a_N \\ b_N \\ \beta_N \end{pmatrix} \right),$$

čia N – CT sluoksnių skaičius, h – atstumas tarp CT sluoksnių.

Taigi metodo x trapecinis įvertis (α, a, b, β) reiškia, kad jis 1) visiškai tinkamas, kai $x \in (a, b)$; arba 2) visiškai netinkamas, kai $x \notin (\alpha, \beta)$; 3) jo tinkamumas nustatomas tiesine funkcija $f(x)$ – tiesės atkarpa, jungiančia taškus $(\alpha, 0)$ ir $(a, 1)$, kai $x \in (\alpha, a)$ ir funkcija $g(x)$ – tiesės atkarpa, jungiančia taškus $(b, 1)$ ir $(\beta, 0)$, kai $x \in (b, \beta)$.

3. Trapeciniams skaičiams konstruoti sprendžiamas toks optimizavimo uždavinys:

$$\min f(\alpha, a, b, \beta),$$

$$m \leq \alpha \leq a \leq b \leq \beta \leq M,$$

$$\begin{aligned} f(\alpha, a, b, \beta) = & \sum_{x_j \notin (\alpha, \beta)} p_j^2 + \sum_{\alpha < x_j < a} \left(p_j - \frac{x_j - \alpha}{a - \alpha} \right)^2 \\ & + \sum_{a \leq x_j \leq b} (1 - p_j)^2 + \sum_{b < x_j < \beta} \left(p_j - \frac{x_j - \beta}{b - \beta} \right)^2. \end{aligned}$$

Čia x_j – įvairiais metodais apskaičiuotas insulto srities plotas (atskirai nagrinėjami visi CT sluoksniai), p_j – eksperto j -tojo metodo įvertis (perskaičiuojamas $0 \leq p_j \leq 1$). Skaičiai m ir M buvo parinkti taip: $m = 0$ (atitinka atvejį, kai insulto sritis neaptikta), $M = 2 \max x_j$ – empiriniu būdu nustatytas režis.

Uždavinys natūraliai skaidomas į mažesnių dimensijų uždavinius:

- 1) nepriklausomai konstruojami trikampiniai skaičiai (α, a, x, x) ir (x, x, b, β) su sąlyga $a \leq x \leq b$;
- 2) po to ieškomas minimumas pagal vieną kintamąjį $x \in (m, M)$.

Pastebėkime, kad trikampiniam skaičiui (x, x, b, β) rasti, galima taikyti skaičiaus (α, a, x, x) konstravimo algoritimą, jei įverčius p_j pakeisti įverčiais $\bar{p}_j = 1 - p_j$.

Algoritmui realizuoti C++ kalba parašyta programa buvo testuojama skaičiuojant tiksliai apibrėžtų trapecinių skaičių charakteristikas pagal funkcijos reikšmes 20–100 taškuose. Taškai buvo renkami kaip su pastoviu žingsniu, taip ir atsitiktinai intervale (m, M) . Funkcijų reikšmės p_j buvo skaičiuojamos ir tiksliai, ir su atsitiktinėmis mažomis paklaidomis Δ_j : ($0 \leq p_j + \Delta_j \leq 1$), $|\Delta_j| \ll p_j$. Visais atvejais algoritmas konvergavo į globalų minimumą.

4. 1 lentelėje pateikiami vieno ligonio CT vieno sluoksnio apdorojimo įvairiais metodais rezultatų dviejų ekspertų vertinimai (stulpeliai E1 ir E2). Palyginimui buvo parinkti 20 atvaizdų atpažinimo metodų ir jų modifikacijų: (1), (2) – vidurkio ir standartinės deviacijos (2 modifikacijos su skirtingomis parametų reikšmėmis); (3), (4) – histogramos, (2 variantai); (5), (6) – skaisčio matricos (2); (7)–(10) – vilnelių (4);

1 lentelė. Skaičiavimų rezultatai

Nr.	P	1E	2E	1T	2T	S
(1)	2142	50	30	70	72	72
(2)	1338	50	20	86	87	87
(3)	2021	50	30	73	74	74
(4)	2597	55	40	61	64	64
(5)	2678	50	50	60	62	62
(6)	2500	65	60	63	65	65
(7)	3976	60	60	34	38	38
(8)	2356	70	50	66	68	68
(9)	2561	65	70	62	64	64
(10)	4322	60	80	27	31	31
(11)	3462	30	30	44	47	47
(12)	3462	30	30	44	47	47
(13)	2663	30	30	60	62	62
(14)	2215	60	50	69	71	71
(15)	629	15	20	14	20	20
(16)	1538	60	60	82	83	83
(17)	3752	30	70	39	42	42
(18)	2598	75	80	61	64	64
(19)	2462	75	80	64	66	66
(20)	3312	75	90	47	50	50

(11)–(14) – atsitiktinių laukų (4); (15), (16) – Furjė (2); (17) – neuronų tinklų ir (18)–(20) – trys sudėtinių algoritmų modifikacijos. Pagal kiekvienu metodu apskaičiuotą insulto srities plotą (stulpelis P; mm^3) gauti abiejų ekspertų trapeciniai įverčiai: $T_1 = (622, 667, 669, 5736)$ ir $T_2 = (619, 668, 669, 6031)$. Stulpeliuose 1T ir 2T surašyti visų metodų įverčiai: charakteristinių funkcijų $\varphi_{T_1}(x)$ ir $\varphi_{T_2}(x)$ reikšmės, kai x – plotas (stulpelis P). Geriausias įvertis (stulpelis S) gali būti gautas ir konstruojant trapecinį skaičių, kurį galima traktuoti kaip dviejų neryškių aibių sąjungą:

$$(\min\{\alpha_1, \alpha_2\}, \min\{a_1, a_2\}, \max\{b_1, b_2\}, \max\{\beta_1, \beta_2\}).$$

Šiuo atveju tai bus toks trapecinis įvertis (619, 667, 669, 6031).

Sumuojant visų sluoksnių įverčius gaunamas insulto srities tūrio trapecinis įvertis. Tai ir yra metodų efektyvumo palyginimo kriterijus. Aprašyta metodika buvo pritaikyta keturių ligonių CT apdorojimo rezultatų ekspertinių įverčių analizei. Pa-

2 lentelė. Metodų efektyvumas

15	4	16	19	5	8	6	1	9	3	17	14	18	13	20	7	11	12	10	2
20	19	18	5	3	1	6	4	9	10	11	12	13	14	15	16	17	2	7	8
13	17	19	20	14	1	4	3	5	6	18	8	2	7	9	15	16	11	12	10
7	10	13	14	6	20	19	9	17	4	11	12	5	1	15	16	2	18	8	3

gal sukonstruotus trapecinius įverčius visų CT apdorojimo metodų tinkamumas buvo įvertintas realiuoju skaičiumi nuo 0 iki 1. 2 lentelėje surašyti metodų vertinimo rezultatai jų efektyvumo mažėjimo tvarka (t. y. pirmajam ligoniui geriausias yra 15 metodas, antrasis pagal efektyvumą – 4 metodas, trečiasis – 16 ir t.t.

5. Atlikus insulto srities metodų analizę, buvo gautos tokios išvados:

1. Universalumo prasme geriausi yra skaisčio matricos [5] ir sudėtinių algoritmų metodai [6], tačiau atskirais atvejais jie gali duoti ir vidutinius rezultatus.
2. Tarp ištirtų atpažinimo metodų nėra tinkamų arba netinkamų visais atvejais.
3. Eksperimentų rezultatai rodo, kad insulto srities kiekybinės charakteristikos įvertinamos apytiksliai.
4. Subjektyvus ekspertų vertinimai nėra vienodi. Tobulinti insulto srities atpažinimo metodų įvertinimą galima geometriniais metodais (žymėti sritį ir skaičiuoti plotą), tačiau toks vertinimas reikalauja nemažo preliminaraus darbo, ruošiant atvaizdus ekspertui vertinti ir gerokai daugiau eksperto darbo laiko.
5. Pagal sukonstruotus tūrių trapecinius įverčius galima efektyviai vertinti naujų atpažinimo algoritmų efektyvumą. Tam jau nereikia spęsti sudėtingo optimizavimo uždavinio.
6. Metodų efektyvumas gali būti padidintas nustatant jų taikymo kriterijus, priklausomai nuo konkretaus atvejo. Tam reikalinga apdorojimo rezultatų statistika.

Literatūra

1. A. Ušinskas, R.A. Dobrovolskis, Galvos smegenų išeminių insultų diagnostika personaliniu kompiuteriu, *Medicina*, **36**(10), 1144–1148 (2000).
2. A. Ušinskas, R. Kirvaitis, Žmogaus galvos smegenų ischeminio insulto automatinės analizės metodų apžvalga, *Elektronika ir elektrotechnika*, **7**(42), 7–14 (2003).
3. L.A. Zadeh, Fuzzy sets, *Information and Control*, **8**, 338–353 (1965).
4. D. Dubois, H. Prade, Decision-making under fuzziness, in: M.M. Gupta, R.K. Ragade, R.R. Jager (Eds.), *Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications*, Publication Corporation, Amsterdam, North-Holland (1979), pp. 279–302.
5. A. Usinskas, B. Tomandl, P. Hastreiter, K. Spinnler, T. Wittenberg, Improvements on the gray level co-occurrence matrix technique to compute ischemic stroke volume, in: *Bildverarbeitung für die Medizin 2002: Algorithmen-Systeme-Anwendungen, Proceedings des Workshop*, (ISSN 1431–472–X), Springer, Leipzig (2002), pp. 267–270.
6. D. Grigaitis, Hibridinis medicininių atvaizdų analizės metodas, kn.: *Šeštoji Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“*, VGTU, Vilnius (2003), pp. 27–32.

SUMMARY

A. Krylovas, A. Ušinskas, V. Gaigalaitė. Analysis of methods for ischemic stroke region recognition on CT slices

There are developed several computer aided methods for recognition of ischemic stroke region on CT slices at this time. This paper discuss about evaluation of such recognition methods with the help of human experts. Presented evaluation is completed by using an algorithm of fuzzy sets. Performed analysis of 20 methods with modifications showed, that gray level co-occurrence matrix method and hybrid method give highest rates. In addition, the evaluations of the same images by human experts are not uniform. More complex geometrical evaluation methods must be used for archiving of the better accuracy.

Keywords: fuzzy sets, pattern recognition, evaluation methods.