

UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREȘTI
Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației
Catedra de Electronică Aplicată și Ingineria Informației

Teză de doctorat

**“MODELE DE CONTUR DEFORMABILE PENTRU
SEGMENTAREA OBIECTELOR PUTERNIC NON-CONVEXE”**

**“DEFORMABLE CONTOUR MODELS FOR
HIGHLY NON-CONVEX OBJECTS SEGMENTATION”**

Rezumat

Doctorand

Ing. Tiberiu Rădulescu

Conducător de doctorat

Prof. Dr. Ing. Vasile Buzuloiu

București

2009

Cuprins

Introducere	3
1. Modelele de contur deformabile în reprezentare parametrică	4
1.1. Formularea matematică prin minimizarea energiei	5
1.2. Ecuația Euler-Lagrange	7
1.3. Formularea dinamică prin forțe	8
1.4. Localizarea conturului inițial și comportamentul modelului deformabil	9
1.5. Abordarea obiectelor non-convexe	10
2. Dezvoltări ale forțelor externe pentru contururile deformabile	10
2.1. Forțele de presiune	11
2.1.1. Trunchierea forțelor în vecinătatea muchiilor	12
2.1.2. Adaptarea la intensitatea regiunilor	13
2.1.3. Adaptarea la statisticile regiunilor	14
2.1.4. O metodă de adaptare combinată	15
2.2. Curgerea vectorilor gradient (GVF)	16
2.3. Forța GVF generalizată (GGVF)	20
2.4. Câmpul electric virtual (VEF)	21
2.5. Convoluția câmpului vectorial (VFC)	23
3. Sisteme dedicate	25
4. Segmentarea obiectelor puternic non-convexe	26
4.1. Soluțiile existente pentru abordarea obiectelor puternic non-convexe	27
4.2. Extensia modelelor GVF/GGVF	27
4.2.1. Contextul matematic	27
4.2.2. Esența metodei	28
4.2.3. Câmpul GVF extins	29
4.2.4. Câmpul GGVF extins	32
4.2.5. Aplicații	32
4.3. Extensia modelului VFC	33
4.3.1. Modelarea anizotropică determinată de imagine	35
4.3.2. Aplicații	36
Retrospectivă și concluzii	38
Bibliografie esențială	40

Introducere

Printre operațiile ce conduc la descrierea conținutului unei imagini, una dintre cele mai importante este detecția muchiilor. În principal, aceasta reduce o imagine la o schiță. Aceste muchii trebuie apoi să fie grupate într-un anumit mod astfel încât să se poată obține/segmenta formele care apar într-o imagine, în condițiile în care zgomotul și artefactele de eșantionare contribuie din plin la deteriorarea rezultatului.

Modelele de contur deformabile sunt forme flexibile care integrează informația dispersată cu privire la muchii și o completează pe cea lipsă într-un fel care este consistent cu percepția observatorului despre conținutul imaginii. Succesul metodei depinde de acuratețea cu care această percepție este transpusă în caracteristicile modelului.

Imediat după apariția lor, aceste modele s-au dovedit a fi un instrument predilect îndeosebi pentru domeniul imagisticii medicale. Cele mai multe din îmbunătățirile care s-au efectuat ulterior au avut ca motivație o anumită cerință venind dinspre acest domeniu, însă modelele de contur deformabile au fost aplicate cu succes într-o varietate enormă de situații.

Conceptul original de model deformabil a fost definit în reprezentare parametrică [9] și această lucrare tratează aspectele esențiale care au fost elaborate în această reprezentare. O altă clasă este constituită de modelele geometrice [1] care au apărut mai târziu și s-au dezvoltat în paralel cu cele parametrice.

Formularea matematică a modelelor parametrice scoate în evidență două dificultăți cheie: modelele trebuie să fie inițializate în apropierea frontierelor și pătrunderea în concavitățile acestora este problematică. Dezvoltările ulterioare au avut ca scop principal eliminarea acestor dificultăți și extinderea capacității de segmentare a modelelor de contur parametrice.

În cadrul tezei este parcurs și analizat întregul traseu evolutiv al modelelor parametrice din perspectiva forțelor care determină procesul de deformare, deoarece felul în care aceste forțe sunt concepute determină în cel mai înalt grad calitatea rezultatelor.

Capitolul 1 prezintă formularea matematică originală a acestor modele și descrie bazele conceptuale ale acestora, care provin din fizica solidului deformabil, teoria aproximării optimale și calculul variațional.

Capitolul 2 prezintă tipurile forțelor de deformare care au fost elaborate cu scopul de a înlătura limitările modelului original. Dintre acestea sunt descrise în continuare forțele de presiune, curgerea vectorilor gradient, câmpul electric virtual și convoluția câmpului vectorial.

Capitolul 3 oferă o enumerare a aplicațiilor curente ce folosesc modelele de contur parametrice pentru segmentarea sau urmărirea mișcării, în diverse domenii (imagistica medicală, biometrie, topografie, conducerea asistată de calculator a vehiculelor etc.), ca probă a interesului pentru subiect.

Capitolul 4 tratează segmentarea obiectelor puternic non-convexe, rămasă nerezolvată bine în pofida performanțelor superioare ale versiunilor prezentate în capitolul 2, și conține inovațiile metodologice ale autorului care permit segmentarea corectă și în aceste cazuri dificile. Lucrarea se încheie cu un scurt capitol de concluzii în care se punctează contribuțiile originale.

1. Modelele de contur deformabile în reprezentare parametrică

Un model de contur deformabil este o curbă definită pe domeniul unei imagini, care se poate deplasa sub influența forțelor interne ce provin din curba însăși și sub influența forțelor externe calculate din datele ce reprezintă imaginea. Dintr-o poziție inițială de plecare dată modelul se deformează pentru a coincide cu cel mai apropiat contur proeminent din imagine. Deformarea este guvernată de procesul de minimizare a unei funcționale de energie.

Datele reprezentând imaginea sunt utilizate pentru a defini funcții de potențial peste domeniul imaginii. Funcțiile de potențial sunt alese astfel încât să prezinte minime locale în dreptul muchiilor de intensitate a imaginii ce apar pe frontierele obiectelor.

Curba este sintetizată în mod parametric pe domeniul imaginii și forțată să se deplaseze către minimul funcției de potențial (adică spre muchii). Forțele ce deplasează curba spre muchii sunt obținute pe baza funcției de potențial și constituie forțele externe. Acțiunea lor este balansată de forțele interne proiectate să mențină curba neîntreruptă (forțele de elasticitate) și să o împiedice să se încovoie prea mult (forțele de încovoiere). În ansamblu, forțele interne și externe sunt definite astfel încât modelul deformabil să se potrivească frontierelor unui obiect dintr-o imagine.

Informațiile referitoare la forma generală, poziția și orientarea obiectelor sunt încorporate în modelul deformabil sub forma condițiilor inițiale, a constrângerilor ce vizează datele și parametrii de formă ai modelului sau în procedura de potrivire a modelului.

Aceste modele au însă câteva avantaje față de tehnicile de extragere de trăsături clasice: sunt ușor de manevrat deoarece au o evoluție autonomă și auto-adaptivă în căutarea unei stări de energie minimă, iar forțele din imagine se comportă într-o manieră intuitivă.

Un alt avantaj al modelului deformabil față de metodele tradiționale de extragere de contururi este conectivitatea sa intrinsecă. Fiind un contur conectat, informația de-a lungul curbei este integrată într-o manieră implicită. Acest fapt este folositor atunci când se analizează imagini alterate de zgomot sau imagini naturale care prezintă adesea contururi cu părți lipsă și pe care modelul deformabil le acoperă datorită conectivității sale intrinseci.

Din cauza felului în care modelele se unduiesc în timp ce își minimizează energia, ele au fost numite șerpi, contururi deformabile, contururi active sau curbe deformabile.

Contururile deformabile sunt utilizate pe scară largă în multe aplicații, acestea incluzând detecția de muchii, modelarea formelor, segmentarea, extragerea conturilor subiective și urmărirea mișcării.

1.1. Formularea matematică prin minimizarea energiei

Premiza de bază pentru construirea unui contur deformabil prin minimizarea energiei este de a găsi o curbă parametrizată a cărei poziție optimă este definită ca soluția unei probleme variaționale ce necesită minimizarea sumei energiilor internă și externă integrate de-a lungul acestei curbe.

Energia internă a conturului caracterizează proprietățile de regularitate ale modelului deformabil: întinderea și netezimea. Energia potențială externă este definită peste domeniul imaginii și posedă în mod tipic minime locale în dreptul muchiilor de intensitate ale imaginii ce apar la marginile obiectelor.

Ecuția Euler-Lagrange corespondentă acestei minimizări poate fi văzută ca o ecuație de echilibru al forțelor: forțele interne mențin conturul conectat (forțele de elasticitate) și îl împiedică să se îndoie prea mult (forțele de îndoire), în timp ce forțele externe atrag curba către marginile dorite ale obiectului. Pentru a găsi marginile obiectului, curbele parametrice sunt inițializate în domeniul imaginii și forțate să se deplaseze către minimele energiei potențiale externe sub influența ambelor tipuri de forțe. Prin introducerea unui parametru temporal t , ecuația de echilibru al forțelor este tratată dinamic. Când ecuația dinamică își atinge starea stabilă este găsită soluția la problema statică.

Din punct de vedere geometric, modelul este reprezentat de o curbă în plan definită printr-o aplicație de la domeniul parametric unidimensional $s \in [0,1]$ la spațiul Euclidian bidimensional $\mathbf{x}(s) = [x(s), y(s)]$. Curba se deplasează prin domeniul spațial al unei imagini, guvernată de minimizarea funcționalei de energie:

$$\mathcal{E}(\mathbf{x}) = \mathcal{E}_{\text{int}}(\mathbf{x}) + \mathcal{E}_{\text{ext}}(\mathbf{x}) = \int_0^1 [E_{\text{int}}(\mathbf{x}(s)) + E_{\text{ext}}(\mathbf{x}(s))] ds \quad (1)$$

E_{int} este densitatea de energie potențială internă a deformației și E_{ext} este densitatea de energie potențială asociată cu câmpul de forțe externe aplicat. Funcționala poate fi văzută ca o reprezentare a energiei conturului, iar forma finală a acestuia corespunde minimului acestei energii.

Primul termen al funcționalei (1) este energia internă de deformație și caracterizează deformația unui contur elastic și flexibil:

$$\mathcal{E}_{\text{int}}(\mathbf{x}) = \int_0^1 [E_{\text{int}}(\mathbf{x}(s))] ds = \int_0^1 \left\{ \frac{1}{2} [\alpha(s) |\mathbf{x}'(s)|^2 + \beta(s) |\mathbf{x}''(s)|^2] \right\} ds \quad (2)$$

unde $\alpha(s)$ și $\beta(s)$ sunt parametrii de ponderare ce controlează tensiunea (elasticitatea) și, respectiv, rigiditatea, iar $\mathbf{x}'(s)$ și $\mathbf{x}''(s)$ denotă prima și a doua derivată a lui $\mathbf{x}(s)$ în raport cu s .

Termenul de ordinul întâi face ca modelul să acționeze ca o membrană sau ca o coardă elastică; $\alpha(s)$ este o măsură a elasticității conturului deformabil și controlează tensiunea de-a lungul curbei sau cantitatea cu care acesta este dispus să se întindă (asemănător cu întinderea unei benzi elastice sau a unui balon). Valori mari pentru $\alpha(s)$ vor crește energia internă a conturului pe măsură ce el continuă să se întindă, în timp ce valori mici pentru $\alpha(s)$ vor face ca energia internă să fie insensibilă la cantitatea cu care conturul se întinde în spațiu.

Termenul de ordinul al doilea face ca modelul deformabil să acționeze ca o tablă subțire sau o sârmă flexibilă; $\beta(s)$ este o măsură a rigidității conturului și controlează gradul în care curba se poate îndoi (asemănător cu o sârmă flexibilă). Valori mari pentru $\beta(s)$ vor crește energia internă a modelului după cum el se ondulează mai mult, în timp ce valori mici pentru $\beta(s)$ vor face ca energia internă să fie insensibilă la îndoirea curbei.

În absența altor constrângeri, un contur deformabil închis va colapsa către un punct întocmai ca o coardă dintr-un material infinit elastic.

Al doilea termen al relației (1) este funcționala de energie potențială externă, calculată prin integrarea unei funcții de energie potențială de-a lungul conturului $\mathbf{x}(s)$:

$$\mathcal{E}_{\text{ext}}(\mathbf{x}) = \int_0^1 [E_{\text{ext}}(\mathbf{x}(s))] ds \quad (3)$$

Densitatea de energie potențială externă, $E_{\text{ext}}(\mathbf{x}(s))$, reprezintă potențialul datorat forțelor provenite din imagine și depinde numai de valorile de intensitate din imagine de-a lungul curbei. Ea este definită astfel încât să ia valori mai mici în dreptul marginilor obiectului.

Fiind dată o imagine cu niveluri de gri, $I(x,y)$, văzută ca o funcție de variabile de poziție (x,y) continue, funcțiile de energie potențială externă tipice proiectate să conducă un contur activ către muchii sunt [18]:

$$E_{\text{ext}}^{(1)}(x,y) = -w_m |\nabla I(x,y)| \quad (4)$$

$$E_{\text{ext}}^{(2)}(x,y) = -w_m |\nabla [G_\sigma(x,y) * I(x,y)]| \quad (5)$$

unde w_m este un parametru de ponderare pozitiv, ∇ este operatorul gradient și $*$ este operatorul de convoluție 2D, iar $G_\sigma(x,y)$ este o funcție Gaussiană bidimensională cu dispersia (deviația standard) σ :

$$G_\sigma(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

Prin urmare curba va fi atrasă de gradientii cu valori mari din imagine, adică de părțile din imagine cu muchii puternice.

Dacă imaginea este binară (un desen liniar), atunci energiile externe sunt [18]:

$$E_{\text{ext}}^{(3)}(x,y) = w_1 I(x,y) \quad (7)$$

$$E_{\text{ext}}^{(4)}(x,y) = w_1 G_\sigma(x,y) * I(x,y) \quad (8)$$

unde w_1 este un parametru de ponderare ale cărui valori pozitive mari determină ca modelul să fie atras către linii negre pe un fond alb în timp ce valorile negative mari determină ca modelul să fie atras către liniile albe pe un fond negru.

În figura 1 sunt prezentate energiile externe pentru diverse valori ale lui σ . Este ușor de văzut din figura 1, efectul asupra imaginii a valorilor progresiv mai mari ale lui σ . Pentru a face ca efectul de frontieră să fie “simțit” la o oarecare distanță de aceasta, adică pentru a crește domeniul de captare din jurul marginilor sunt adesea necesare valori mari ale lui σ . Însă, valori mai mari ale lui σ produc o deplasare a poziției frontierei conducând la un rezultat mai puțin precis.

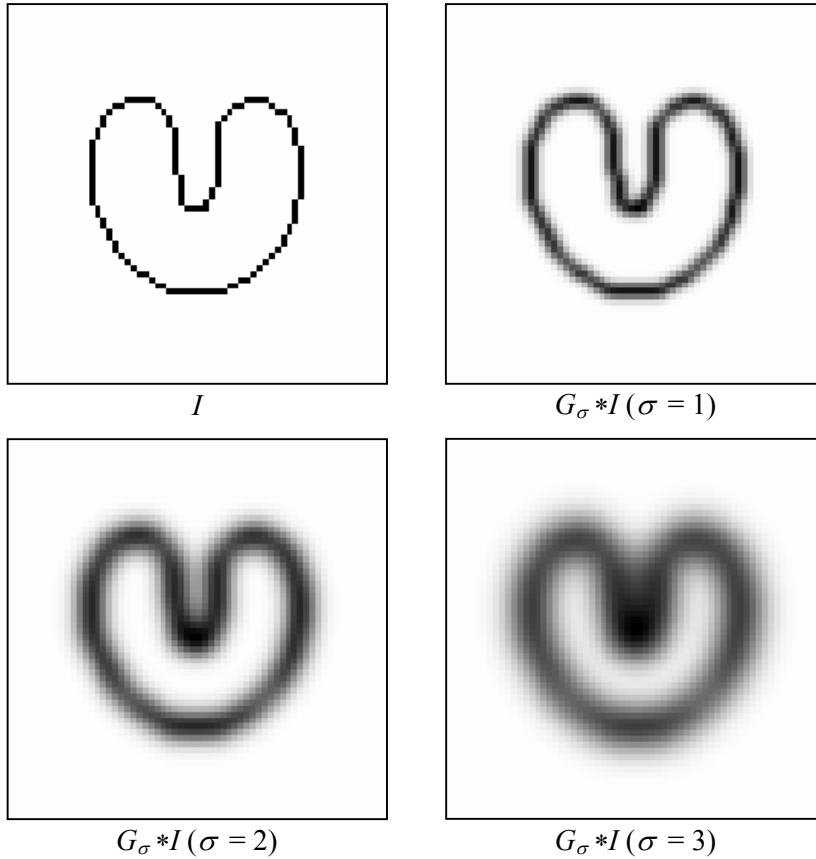


Fig. 1 – Energia externă pentru un desen liniar negru pe fond alb (64x64).

1.2. Ecuația Euler-Lagrange

Funcționala de energie (1) a cărei minimizare guvernează deplasarea conturului deformabil se va scrie prin urmare:

$$\mathcal{E}(\mathbf{x}(s)) = \int_0^1 \left\{ \frac{1}{2} [\alpha(s) |\mathbf{x}'(s)|^2 + \beta(s) |\mathbf{x}''(s)|^2] + E_{\text{ext}}(\mathbf{x}(s)) \right\} ds \quad (9)$$

Problema găsirii unei curbe $\mathbf{x}(s)$ ce minimizează funcționala de energie \mathcal{E} este cunoscută ca o problemă variațională, a cărei soluție trebuie să satisfacă ecuația Euler-Lagrange:

$$(\alpha(s) \mathbf{x}'(s))' - (\beta(s) \mathbf{x}''(s))'' - \nabla E_{\text{ext}} = 0 \quad (10)$$

Ecuația (10) poate fi văzută ca o ecuație de echilibru al forțelor:

$$\mathbf{F}_{\text{int}} + \mathbf{F}_{\text{ext}}^{(p)} = 0 \quad (11)$$

unde $\mathbf{F}_{\text{int}} = (\alpha(s) \mathbf{x}'(s))' - (\beta(s) \mathbf{x}''(s))''$ sunt forțele interne din care $(\alpha(s) \mathbf{x}'(s))'$ sunt forțele de elasticitate și $-(\beta(s) \mathbf{x}''(s))''$ sunt forțele de încovoiere, iar $\mathbf{F}_{\text{ext}}^{(p)} = -\nabla E_{\text{ext}}$ sunt forțele externe care se scriu ca gradientul negativ al funcției de energie potențială externă. Forțele interne descurajează întinderea și îndoirea în timp ce forțele externe de potențial trag conturul deformabil către muchiile dorite din imagine. În figura 2 sunt prezentate forțele externe corespunzătoare desenului din figura 1.

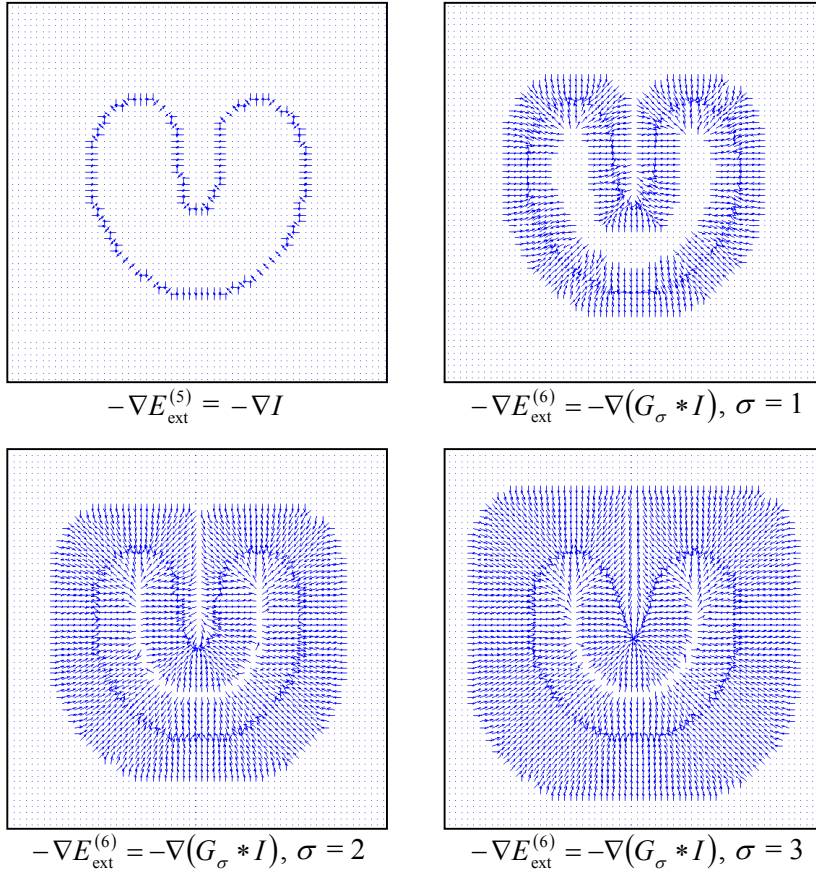


Fig. 2 – Forțele externe de potențial pentru desenul din figura 1.

Pentru a găsi soluția ecuației (10), conturul deformabil este privit dinamic prin considerarea lui \mathbf{x} ca o funcție și de timpul t și de parametrul s , adică $\mathbf{x}(s, t)$. Apoi, se stabilește derivata parțială a lui \mathbf{x} în raport cu t egală cu membrul stâng al ecuației (10), după cum urmează:

$$\gamma \mathbf{x}_t(s, t) = (\alpha(s) \mathbf{x}'(s, t))' - (\beta(s) \mathbf{x}''(s, t))'' - \nabla E_{\text{ext}} \quad (12)$$

sau:

$$\gamma \mathbf{x}_t(s, t) = (\alpha(s) \mathbf{x}'(s, t))' - (\beta(s) \mathbf{x}''(s, t))'' + \mathbf{F}_{\text{ext}}^{(p)}(\mathbf{x}) \quad (13)$$

unde coeficientul de vâscozitate γ este introdus pentru a face ca unitatea de măsură a membrului stâng să fie consistentă cu cea a membrului drept.

Când soluția $\mathbf{x}(s, t)$ se stabilizează, termenul $\mathbf{x}_t(s, t)$ dispare și obținem o soluție a ecuației (10). Astfel, minimizarea este rezolvată prin plasarea unui contur inițial în domeniul imaginii care se va deforma în conformitate cu ecuația (13).

1.3. Formularea dinamică prin forțe

În secțiunea precedentă, modelul de contur deformabil a fost formulat ca o problemă statică în care a fost introdusă în mod artificial variabila temporală t pentru a minimiza energia.

Totuși, uneori este mai convenabil să se formuleze modelul în mod direct dintr-o problemă dinamică de forțe [19]. O astfel de formulare permite utilizarea unor tipuri mai generale de forțe externe

care nu sunt forțe de potențial, adică forțe care nu pot fi scrise ca gradientul negativ al unor funcții de energie potențială. În conformitate cu a doua lege a lui Newton, dinamica unui contur $\mathbf{x}(s, t)$ trebuie să satisfacă relația:

$$\mu \frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} = \mathbf{F}_{\text{vâsc}}(\mathbf{x}) + \mathbf{F}_{\text{int}}(\mathbf{x}) + \mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{x}) \quad (14)$$

unde μ este densitatea de masă, iar $\mathbf{F}_{\text{vâsc}}$ este forța de vâscozitate definită ca $-\gamma \partial \mathbf{x} / \partial t$, cu γ coeficientul de vâscozitate. La segmentarea imaginilor, densitatea de masă, μ din fața termenului inerțial, este adesea luată zero deoarece termenul inerțial poate face ca modelul deformabil să treacă peste muchiile slabe. Dinamica modelului de contur deformabil fără termenul inerțial devine:

$$\gamma \mathbf{x}_t(s, t) = \mathbf{F}_{\text{int}}(\mathbf{x}) + \mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{x}) \quad (15)$$

unde forțele interne sunt aceleași ca cele corespunzătoare relației (11), iar forțele externe pot fi forțe derivate dintr-o funcție de potențial sau nu.

Forțele externe care nu sunt derivate dintr-o funcție de potențial nu mai pot fi formulate în cadrul variațional al minimizării energiei prezentat anterior, iar ecuația de echilibru al forțelor nu va mai reprezenta ecuația Euler-Lagrange a problemei minimizării energiei. Pierderea proprietății de optimalitate este, totuși, bine compensată de performanțele semnificativ îmbunătățite ale modelului de contur deformabil sub acțiunea noilor tipuri de forțe.

O soluție numerică pentru ecuația (13) sau pentru ecuația (15) poate fi găsită prin discretizarea acestora și rezolvarea iterativă a sistemului discret [9]. În mod evident, prin utilizarea diferitelor valori pentru parametrii modelului, pot fi obținute soluții diferite. În aplicații, alegerea valorilor pentru α , β , și γ trebuie să fie făcută foarte atent. De fapt, aceasta este partea cea mai dificilă la utilizarea modelelor de contur deformabile pentru extragerea practică a trăsăturilor. O altă dificultate este aceea că rezultatul depinde de locul în care este plasat conturul inițial.

1.4. Localizarea conturului inițial și comportamentul modelului deformabil

Pentru a porni evoluția unui contur deformabil trebuie să îi fie specificată mai întâi localizarea inițială. Aceasta are următoarele consecințe asupra evoluției curbei, așa cum se arată în [3]:

- a) Dacă modelul deformabil nu este suficient de aproape de o muchie, el nu va fi atras spre ea.
- b) Dacă modelul nu este supus acțiunii nici unei forțe externe, el se va strânge datorită acțiunii forțelor interne de tensiune și încovoiere.
- c) Dacă un punct al curbei este suficient de aproape de muchie, în zona de captare din jurul acesteia, el va fi atras spre aceasta, iar punctele învecinate ale curbei se vor alipi, de asemenea, muchiei. Dacă astfel de puncte sunt suficient de multe, restul curbei va urmări muchia, puțin câte puțin.

Această evoluție este înfățișată în figura 3 și relevă o proprietate interesantă, aceea că, dacă o parte a conturului deformabil găsește o trăsătură a imaginii de energie scăzută, termenul ce reprezintă energia internă va trage părțile învecinate ale acestuia către o posibilă continuare a acelei trăsături [9].

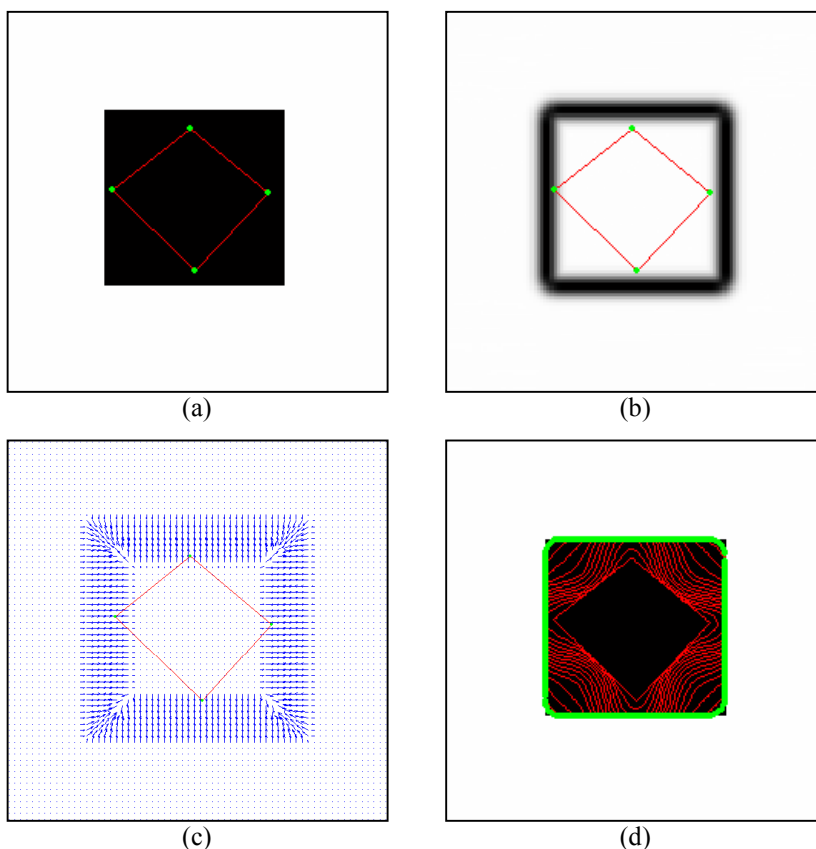


Fig. 3 – (a) Inițializarea modelului pe o imagine cu două niveluri de intensitate; (b) energia externă; (c) forțele externe; (d) evoluția curbei și rezultatul final.

1.5. Abordarea obiectelor non-convexe

Figura 4 prezintă evoluția unui contur deformabil inițializat în vecinătatea obiectului din figura 1 având o frontieră concavă în partea de sus. Soluția finală nu reconstituie porțiunea concavă a formei U.

Motivul pentru insuficienta convergență a conturului deformabil apare în figura 4(d): deși forțele externe sunt orientate în mod corect înspre frontiera obiectului, în interiorul concavității forțele sunt orientate orizontal *în direcții opuse*. Prin urmare, conturul activ nu face nici un progres descendent în interiorul concavității. Notabil este faptul că soluția finală din figura 4 rezolvă ecuațiile Euler-Lagrange ale formulării modelului de contur deformabil care corespunde așadar unui minimum local al funcționalei de energie, însă trece peste regiunea concavă.

2. Dezvoltări ale forțelor externe pentru contururile deformabile

Există, așadar, două dificultăți cheie în ceea ce privește algoritmul modelului parametric al conturilor deformabile. Prima este aceea că, în general, conturul inițial trebuie să fie aproape de marginile reale ale obiectului. A doua problemă este aceea că modelul de contur deformabil întâmpină rezistență la propagarea în concavitățile marginilor. Prin urmare, eforturile cercetătorilor s-au orientat în

continuare pentru a elabora tipuri de forțe externe care să determine o mai bună manevrare a conturului deformabil.

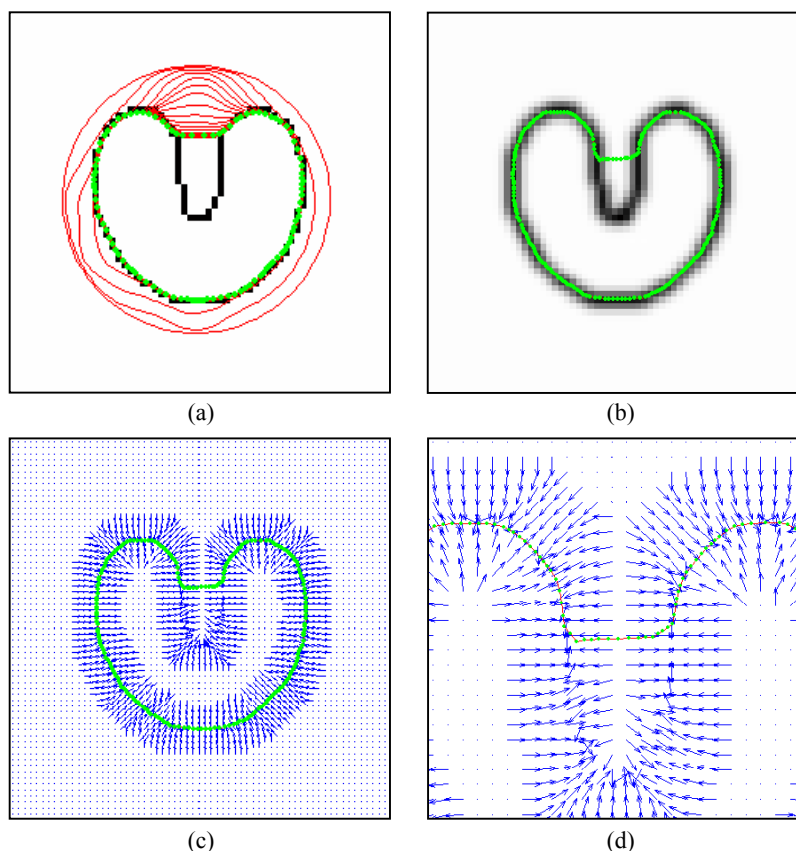


Fig. 4 – (a) Inițializarea și convergența conturului deformabil; (b) Energia externă; (c) Forțele externe; (d) Prim-plan al forțelor externe în concavitatea frontierelor.

2.1. Forțele de presiune

Forțele de presiune au fost introduse în [19, 3] pentru a deplasa modelul către muchiile de intensitate din imaginea $I(x, y)$ până când i se opun forțele de potențial din imagine. Ele sunt:

$$\mathbf{F}_p(\mathbf{x}) = k_1 \mathbf{n}(\mathbf{x}) \quad (16)$$

unde $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ este vectorul unitar normal la contur în punctul $\mathbf{x}(s)$ și k_1 este amplitudinea acestor forțe. Semnul lui k_1 determină dacă modelul se va dilata sau se va contracta și este ales de către utilizator.

Forța externă de potențial se normalizează și se ponderează, astfel încât valorile mai mici sau mai mari ale gradientului imaginii vor avea aceeași influență asupra curbei. Forța externă totală ce determină deplasarea modelului devine:

$$\mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{x}) = k_1 \mathbf{n}(\mathbf{x}) - k \frac{\nabla E}{|\nabla E|} \quad (17)$$

Prin încorporarea forțelor de presiune în modelul de contur deformabil este permisă inițializarea acestuia la mare distanță de poziția finală dorită, asigurând în continuare convergența.

Poziția inițială poate fi ori în interiorul ori în afara conturului vizat. Comportamentul este ilustrat în figura 5.

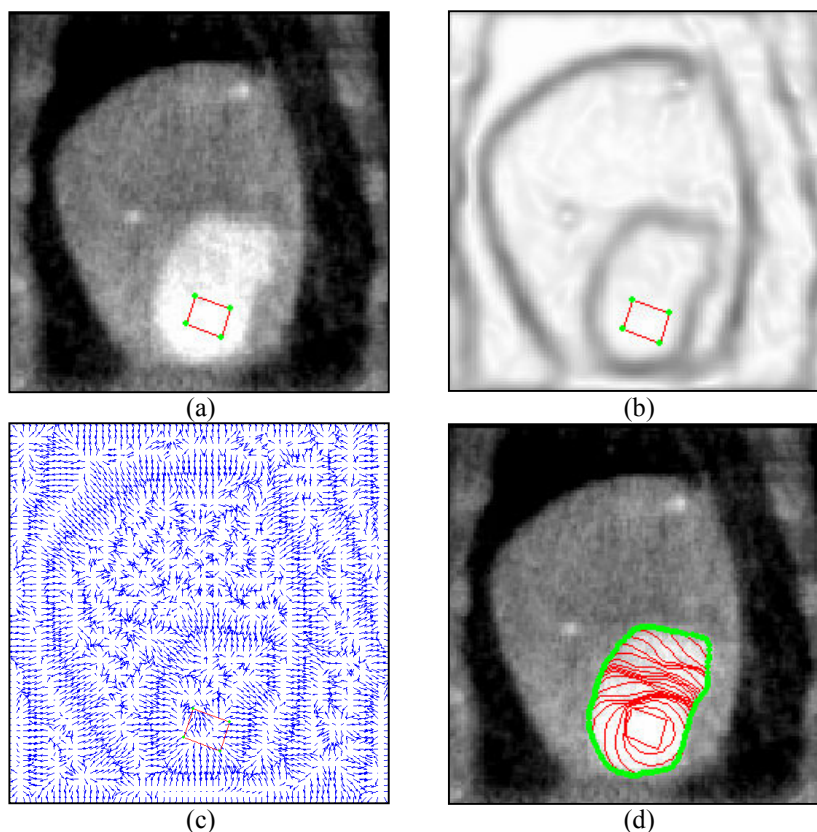


Fig. 5 – (a) O imagine CT a ventriculului stâng al inimii canine – cu inițializarea conturului suprapusă; (b) Energia externă; (c) Forțele de potențial externe; (d) Evoluția modelului.

2.1.1. Trunchierea forțelor în vecinătatea muchiilor

Deseori forțele de presiune, dacă nu sunt prea mici pentru a determina conturul să atingă muchiile, ele pot fi prea puternice, iar forțele de potențial comparativ prea slabe pentru a împiedica conturul să treacă peste aceste muchii. Pentru a preveni acest lucru și pentru a determina conturul să fie ghidat numai de forțele din imagine fără să mai fie condus și de forțele de presiune atunci când se află aproape de margini, forțele de presiune sunt trunchiate în regiunile unde nivelul gradientului este mare.

Prin urmare, ecuația (17) devine [4]:

$$\mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{x}) = k_1 \mathbf{n}(\mathbf{x}) u(-\tilde{I} + T) - k \frac{\nabla E}{|\nabla E|} \quad (18)$$

unde \tilde{I} este mărimea gradientului imaginii netezite scalată în intervalul $[0,1]$, $u(z)$ reprezintă funcția treaptă și T este un prag pozitiv subunitar introdus astfel încât pentru toate regiunile imaginii unde mărimea gradientului depășește acest prag forțele de presiune sunt anulate.

Astfel, pentru o valoare mică a lui T , forțele de presiune vor fi trunchiate chiar pentru o valoare medie a gradientului. Pentru o valoare mare a lui T , doar valorile foarte mari ale gradientului vor produce trunchierea. Figura 6 prezintă o astfel de situație.

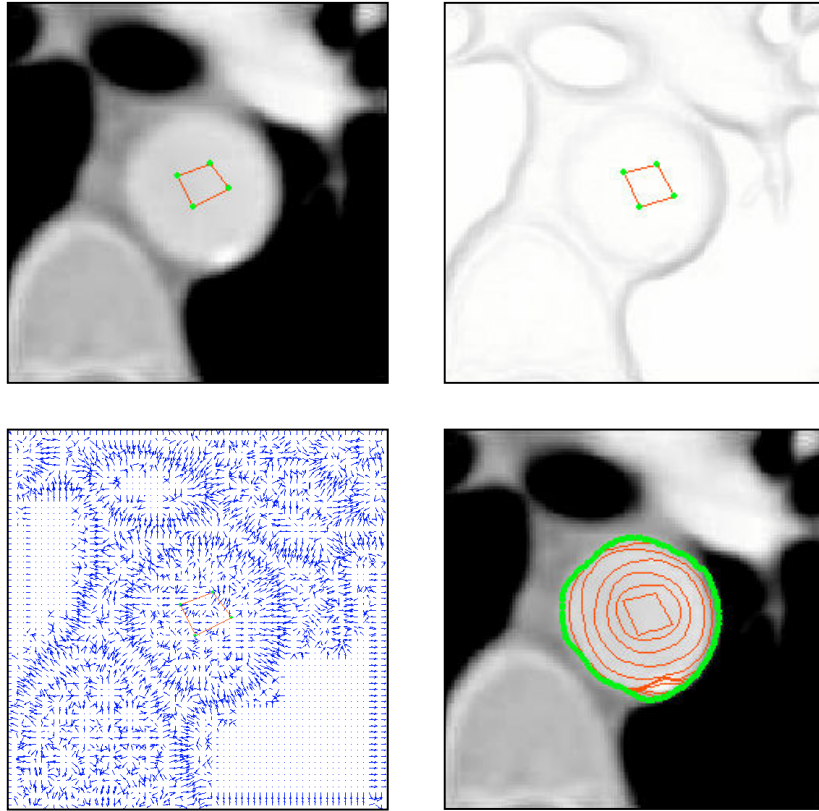


Fig. 6 – O imagine CT a aortei.

2.1.2. Adaptarea la intensitatea regiunilor

Un alt dezavantaj al forțelor de presiune este faptul că semnul acestora determină univoc comportamentul modelului care ori se va dilata ori se va contracta. Următorul pas de rafinare constă în a încorpora informația spațială substanțială în procesul de segmentare [8].

În funcție de intensitatea lor, pixelii din vecinătatea zonei de interes sunt clasificați ca aparținând sau nu obiectului de interes. În dreptul pixelilor aparținând obiectului de interes semnul forțelor de presiune va produce dilatarea modelului, iar în dreptul pixelilor aparținând fundalului semnul forțelor de presiune va produce contractia modelului.

Din punctul de vedere al implementării, se definește o funcție binară de imagine, $b(I(x,y))$, care dă semnul forțelor de presiune pentru fiecare pixel:

$$b(x,y) = \begin{cases} +1 & \text{pentru } I(x,y) \geq B \\ -1 & \text{pentru } I(x,y) < B \end{cases} \quad (19)$$

unde B este pragul de intensitate pe baza căruia se face clasificarea menționată anterior și care determină când forțele de presiune își schimbă sensul. Ca urmare, forțele exterioare devin:

$$\mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{x}) = k_1 b(\mathbf{x}) \mathbf{n}(\mathbf{x}) - k \frac{\nabla E}{|\nabla E|} \quad (20)$$

unde k_1 este un parametru pozitiv corespunzător amplitudinii forțelor de presiune.

Figurile 7 și 8 exemplifică această strategie.

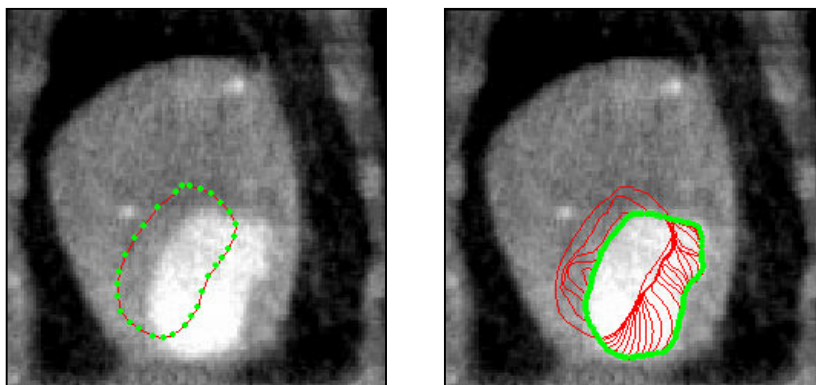


Fig. 7 – Imaginea din figura 5 și evoluția conturului.

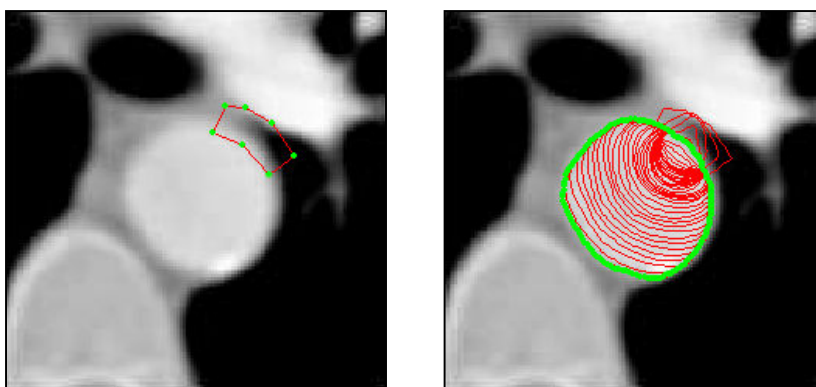


Fig. 8 – Imaginea din figura 6 și evoluția conturului.

2.1.3. Adaptarea la statisticile regiunilor

În elaborarea forțelor de presiune pot fi încorporate mai departe statisticile intensității imaginii corespunzătoare regiunilor de interes, extinzând funcția (19) după cum urmează [7]:

$$b(x,y) = \begin{cases} +1 & \text{pentru } |I(x,y) - \mu_0| \leq B_1 \sigma_0 \\ -1 & \text{pentru } |I(x,y) - \mu_0| > B_1 \sigma_0 \end{cases} \quad (21)$$

unde μ_0 este intensitatea medie a obiectului țintă, σ_0 este deviația standard a acestuia, iar B_1 este o constantă definită de utilizator care specifică numărul de deviații standard față de medie care vor fi acceptate până când forțele de presiune își schimbă sensul. Valorile parametrilor μ_0 și σ_0 sunt calculate din imagine.

În acest fel se creează un model activ de regiune ce se dilată până când elementele sale întâlnesc pixeli cu intensități ce se situează în afara limitelor statistice relative la media zonei de interes definite de utilizator. În acest moment forțele de presiune se inversează determinând modelul să se contracte. Strategia este aplicată în figura 9.

Utilizând o funcție binară se poate întâmpla ca modelul să nu atingă echilibrul și să intre în oscilație datorită faptului că forțele de presiune își schimbă sensul în mod continuu după cum conturul trece dintr-o parte în cealaltă a frontierei regiunii de interes.

O variantă mai stabilă poate fi generată utilizând un termen normalizat de scalare liniară care anulează forțele de presiune atunci când conturul întâlnește pixeli aflați la limitele statistice [7]:

$$b(x,y) = 1 - \frac{|I(x,y) - \mu_0|}{B_1 \sigma_0} \quad (22)$$

Forța de presiune liniară normalizată este maximă atunci când $I(x,y) - \mu_0 = 0$ determinând modelul să se dilate rapid. Invers, când $|I(x,y) - \mu_0|$ este foarte mare, modelul se contractă foarte rapid. Atunci când $|I(x,y) - \mu_0| = B_1 \sigma_0$ forța de presiune este zero, permițând modelului să se stabilizeze.

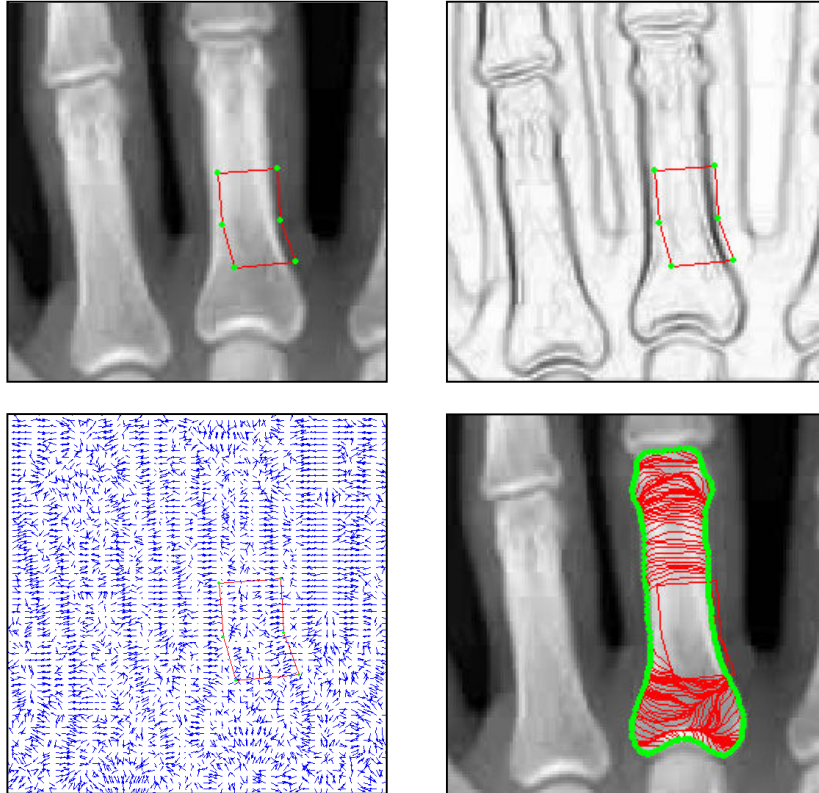


Fig. 9 – O imagine radiografică a mâinii și evoluția conturului.

2.1.4. O metodă de adaptare combinată

Scalarea liniară menționată anterior am folosit-o într-un context diferit și anume pentru a modifica metoda de trunchiere în vecinătatea muchiilor din relația (18) și a o combina apoi cu schema de adaptare la intensitatea regiunilor dată de ecuațiile (19) și (20), după cum urmează:

$$\mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{x}) = k_1 b(\mathbf{x}) \mathbf{n}(\mathbf{x}) (1 - \tilde{I}) - k \frac{\nabla E}{|\nabla E|} \quad (23)$$

unde k_1 este un parametru pozitiv ce reglează amplitudinea forțelor de presiune, iar b este dat de relația (19). Prin relația (23) se modulează valoarea forțelor de presiune atât în funcție de intensitatea imaginii, cât și în funcție de mărimea gradientului imaginii netezite. Adaptarea în funcție de intensitatea imaginii

determină semnul forțelor de presiune (dilatarea sau contracția conturului deformabil) după cum acesta se află în interiorul sau în exteriorul obiectului de interes. Adaptarea în funcție de mărimea gradientului imaginii face ca valoarea forțelor de presiune să fie maximă în zonele de intensitate constantă, descrescătoare pe măsură ce muchiile se intensifică și minimă în dreptul muchiilor proeminente.

Metoda permite o mai mare flexibilitate la stabilirea parametrilor și tolerează o inițializare grosieră a conturului deformabil peste marginile obiectului de interes, așa cum se arată în figura 10. Această contribuție încă nu a făcut obiectul unei publicații.

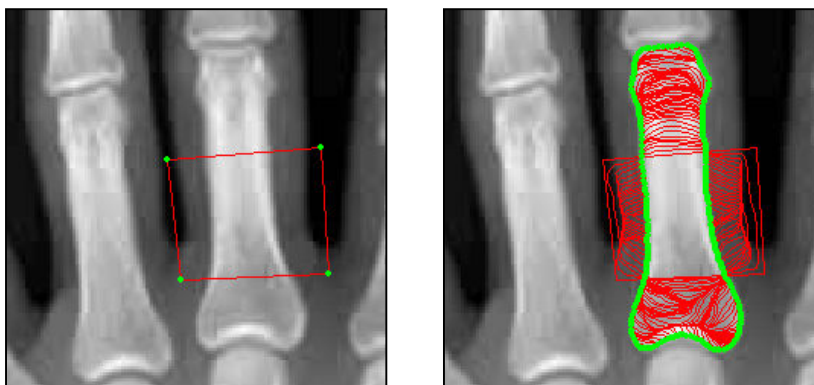


Fig. 10 – Imaginea din figura 9 și evoluția conturului.

Metodele de adaptare prezentate anterior extind abilitatea forțelor de presiune de a manevra conturul deformabil însă nu elimină complet necesitatea de a corela mărimea forțelor de presiune cu valoarea celorlalți parametri. În plus, utilizarea forțelor de presiune în cazul muchiilor discontinue ale obiectelor este extrem de problematică. De aceea, demersurile ulterioare care vizează obținerea unor noi tipuri de forțe externe sunt justificate.

2.2. Curgerea vectorilor gradient (GVF)

Curgerea vectorilor gradient (GVF – Gradient Vector Flow) este introdusă în [21] ca un tip de forță externă statică care conduce la un domeniu larg de captare în jurul muchiilor și este orientată către concavitățile frontierelor.

Premisa matematică ce stă la baza elaborării acestor forțe vine de la teorema lui Helmholtz care afirmă că cel mai general câmp vectorial static poate fi descompus în două componente: o componentă irotatională (fără rotor) și o componentă solenoidală (fără divergență). Câmpurile irotationale mai sunt numite câmpuri conservative și ele pot fi reprezentate ca gradientul unei funcții de potențial scalare. O forță de potențial externă $\mathbf{F}_{\text{ext}}^{(p)}$ generată din formularea variațională a modelelor de contur deformabile trebuie să intre în ecuația de echilibru al forțelor (11) ca un câmp irotational static, întrucât ea este gradientul unei funcții de potențial. Prin urmare, un tip mai general de forță externă, $\mathbf{F}_{\text{ext}}^{(g)}$, poate fi obținut admițând posibilitatea ca ea să cuprindă atât o componentă irotatională, cât și una solenoidală.

Pe scurt, câmpul de curgere a vectorilor gradient este calculat ca difuzia vectorilor gradient al hărții de muchii. Prin acest proces de difuzie se obține un domeniu de captare larg, iar forțele permit inițializarea flexibilă a modelului în afara, interiorul sau de-a lungul marginilor obiectului și îl conduc în concavitățile acestuia fără a avea nevoie de informații suplimentare așa cum se întâmplă în cazul utilizării forțelor de presiune. De asemenea, permit reconstituirea conturilor subiective sau întrerupte și integrarea punctelor împrăștiate într-un contur coerent, permițând curbei deformabile să realizeze fără limitări funcția de integrare a informației despre muchii într-un mod consistent și coerent. Curba parametrică ce rezolvă ecuația dinamică (15) este numită model deformabil GVF sau șarpe GVF.

Mai întâi se definește o hartă a muchiilor $f(x,y)$ derivată din imaginea $I(x,y)$ cu proprietatea că are valori mai mari în apropierea muchiilor din imagine. Se poate utiliza orice hartă a muchiilor cu niveluri de gri sau binară. În exemplele prezentate în continuare se vor folosi:

$$f(x,y) = -E_{\text{ext}}^{(i)}(x,y) \quad (24)$$

unde $i = 1 \div 4$, energiile externe fiind date de relațiile 4, 5, 7, 8.

Hărțile de muchii au trei proprietăți generale: a) gradientul unei hărți a muchiilor, ∇f , are vectori orientați către muchii, astfel încât un contur deformabil inițializat aproape de muchie va converge spre o configurație stabilă în apropierea muchiei; b) acești vectori au de obicei mărimi mari numai în imediata vecinătate a muchiilor, având ca rezultat un domeniu de captare în jurul muchiilor îngust; c) în regiunile omogene, unde $I(x,y)$ este aproape constant, ∇f este aproape zero și, prin urmare, nu mai este disponibilă nici o informație în privința muchiilor la o distanță mai mare de acestea, astfel încât regiunile omogene nu vor fi parcurse de nici un fel de forțe externe.

Câmpul de curgere a vectorilor gradient este definit ca $\mathbf{v}(x,y) = [u(x,y), v(x,y)]$ - un câmp vectorial ce minimizează funcționala de energie:

$$\mathcal{E} = \iint \left\{ \mu |\nabla \mathbf{v}|^2 + |\nabla f|^2 |\mathbf{v} - \nabla f|^2 \right\} dx dy \quad (25)$$

sau

$$\mathcal{E} = \iint \left\{ \mu (u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2) + |\nabla f|^2 |\mathbf{v} - \nabla f|^2 \right\} dx dy \quad (26)$$

Această formulare se bazează pe un principiu variațional clasic ce are ca scop completarea regiunilor unde informația despre formă nu este local disponibilă cu informație adusă din regiunile unde aceasta este disponibilă. Se vede din relația (26) că în regiunile omogene unde $|\nabla f|$ este mic, energia este dominată de suma de pătrate ale derivatelor parțiale ale câmpului vectorial care conduce la un câmp lent variabil. Primul termen al integrandului are, așadar, un efect de netezire. În zona muchiilor unde $|\nabla f|$ este mare, al doilea termen domină integrandul care este minimizat punând $\mathbf{v} = \nabla f$. În acest fel, minimizarea funcționalei (26) produce efectul dorit de păstrare a lui \mathbf{v} aproape egal cu gradientul hărții de muchii atunci când acesta are valori mari, dar forțând câmpul să fie lent variabil în regiunile omogene. Parametrul μ reglează ponderea între primul și al doilea termen al integrandului. Acest parametru ar trebui stabilit în funcție de cantitatea de zgomot din imagine (dacă există mai mult zgomot se crește μ). În mod uzual, $0 < \mu < 0.2$.

Minimizarea funcționalei (26) se face prin utilizarea calculului variațional și conduce la următoarele ecuații Euler-Lagrange prin a căror rezolvare poate fi găsit câmpul GVF:

$$\mu \nabla^2 \mathbf{v} - (\mathbf{v} - \nabla f) \cdot |\nabla f|^2 = 0 \quad (27)$$

sau, pe componente:

$$\mu \nabla^2 u - (u - f_x)(f_x^2 + f_y^2) = 0 \quad (28)$$

$$\mu \nabla^2 v - (v - f_y)(f_x^2 + f_y^2) = 0 \quad (29)$$

unde $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ este operatorul Laplacian aplicat separat fiecărei componente a lui \mathbf{v} .

Ecuațiile (28) și (29) definesc mecanismul de difuzie pe care se bazează formularea GVF. Într-o regiune omogenă, unde $I(x,y)$ este constant, al doilea termen în fiecare ecuație este zero deoarece gradientul lui $f(x,y)$ este zero și, într-o astfel de regiune, u și v sunt fiecare determinate de ecuațiile lui Laplace, iar câmpul GVF rezultat este interpolat din regiunea frontierei. Această interpolare are drept rezultat “umplerea” regiunilor omogene cu informația luată din regiunea frontierelor, iar procesul de difuzie reflectă o competiție printre vectorii gradientului care arată de ce GVF conduce la componente ce sunt orientate spre concavitățile regiunilor.

Ecuația (27) poate fi rezolvată prin tratarea lui \mathbf{v} ca funcție de timp, conducând la:

$$\mathbf{v}_t = \mu \nabla^2 \mathbf{v} - (\mathbf{v} - \nabla f) \cdot |\nabla f|^2 \quad (30)$$

cu condiția inițială $\mathbf{v}(\mathbf{x},0) = \nabla f(\mathbf{x})$, sau pe componente:

$$u_t(x,y,t) = \mu \nabla^2 u(x,y,t) - (u(x,y,t) - f_x(x,y)) \cdot (f_x^2(x,y) + f_y^2(x,y)) \quad (31)$$

$$v_t(x,y,t) = \mu \nabla^2 v(x,y,t) - (v(x,y,t) - f_y(x,y)) \cdot (f_x^2(x,y) + f_y^2(x,y)) \quad (32)$$

Soluția permanentă (când $t \rightarrow \infty$) a acestor ecuații parabolice liniare este soluția dorită a ecuațiilor Euler-Lagrange (28) și (29).

Ecuațiile (31) și (32) sunt decuplate și pot fi rezolvate ca ecuații scalare separate cu derivate parțiale în u și v . Ele sunt cunoscute ca ecuațiile generalizate de difuzie. După ce se calculează, $\mathbf{v}(x,y)$ va fi introdus în ecuația (15) ca singura forță externă ce acționează asupra conturului deformabil.

Figura 11(a) arată inițializarea, câmpul GVF și evoluția modelului pentru $\mu = 0.1$ și 80 de iterații. Din comparația câmpului din figura 11(a) cu forțele externe de potențial din figura 4, rezultă că domeniul de captare din jurul muchiilor este mult mai mare atunci când GVF este utilizat ca forță externă. O a doua observație este aceea că vectorii GVF au o componentă descendentă în concavitățile frontierei.

Una din aplicațiile modelelor de contur deformabile este reconstruirea conturilor subiective care sunt muchii ce nu sunt prezente în mod efectiv în imagine, dar sunt percepute ca atare [9]. Acest efect se poate vedea în figura 11(b) în care observatorul conectează mental muchiile fragmentelor prezente în imagine având impresia că percepe o figură închisă. Figura 11(b) arată că modelul GVF converge către ceea ce este asimilat ca fiind o frontieră subiectivă.

Figura 11(c) prezintă o imagine a unui obiect sub formă de U peste care s-a suprapus zgomot aditiv Gaussian, iar figura 11(d) prezintă o imagine RMN. Rezultatele arată o bună convergență către frontieră, în pofida inițializării departe de obiect, a zgomotului și a concavității frontierei.

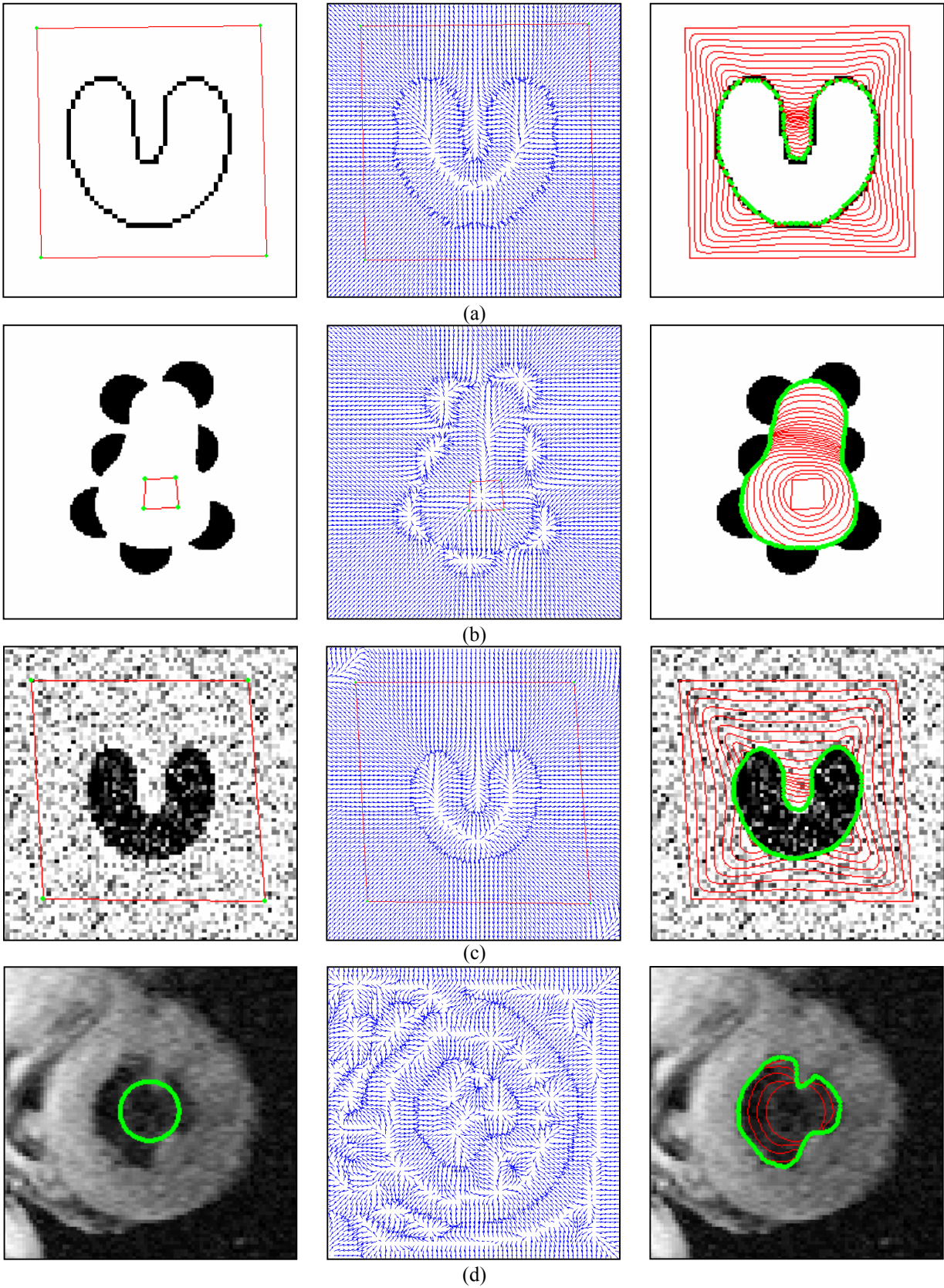


Fig. 11 – Inițializarea, câmpul și evoluția modelului GVF.

2.3. Forța GVF generalizată (GGVF)

Așa cum s-a văzut anterior, curgerea vectorilor gradient are unele proprietăți care sunt de dorit în calitate de forță externă pentru modelele de contur deformabile. GVF are totuși dificultăți în a conduce o curbă deformabilă în frontierele foarte înguste și foarte adânci. Acest lucru se datorează unei neteziri excesive a câmpului în apropierea frontierelor, netezire guvernată de coeficientul μ în ecuația (30), și este rezolvat în [22] prin introducerea unei funcții de ponderare variabilă spațial în locul constantei μ . În această nouă formulare, numită câmp GVF generalizat (GGVF), se înlocuiesc atât μ , cât și $|\nabla f|^2$ în ecuația (30) prin funcții de ponderare mai generale.

Câmpul GGVF se definește ca soluția de echilibru a următoarei ecuații vectoriale cu derivate parțiale:

$$\mathbf{v}_t = g(|\nabla f|) \nabla^2 \mathbf{v} - h(|\nabla f|) \cdot (\mathbf{v} - \nabla f) \quad (33)$$

Întrucât funcțiile de ponderare g și h sunt dependente de mărimea gradientului hărții de muchii care este variabilă spațial, ponderile însele vor fi variabile spațial în general. Deoarece este de dorit un câmp vectorial \mathbf{v} lent variabil (sau neted) în locurile îndepărtate față de muchii, dar apropiat de ∇f lângă muchii, g ar trebui să fie monoton necrescătoare, iar h ar trebui să fie monoton nedescrescătoare cu $|\nabla f|$.

Funcțiile de ponderare se aleg:

$$g(|\nabla f|) = e^{-\left(\frac{|\nabla f|}{K}\right)^2} \quad (34)$$

$$h(|\nabla f|) = 1 - g(|\nabla f|) \quad (35)$$

Câmpul GGVF calculat utilizând această pereche de funcții va fi conform gradientului hărții de muchii în dreptul muchiilor puternice și foarte lent variabil departe de frontieră. Alegerea lui K va determina un balans între netezimea câmpului și conformitatea cu gradientul hărții de muchii.

Comparând rezultatul din figura 11(d) cu rezultatul obținut în figura 12 se constată că atât modelul GVF, cât și modelul GGVF au detectat detaliile esențiale ale frontierei endocardului. Totuși, mușchii papilari ce intră în interiorul cavității au fost reprezentați cel mai bine de către modelul GGVF.

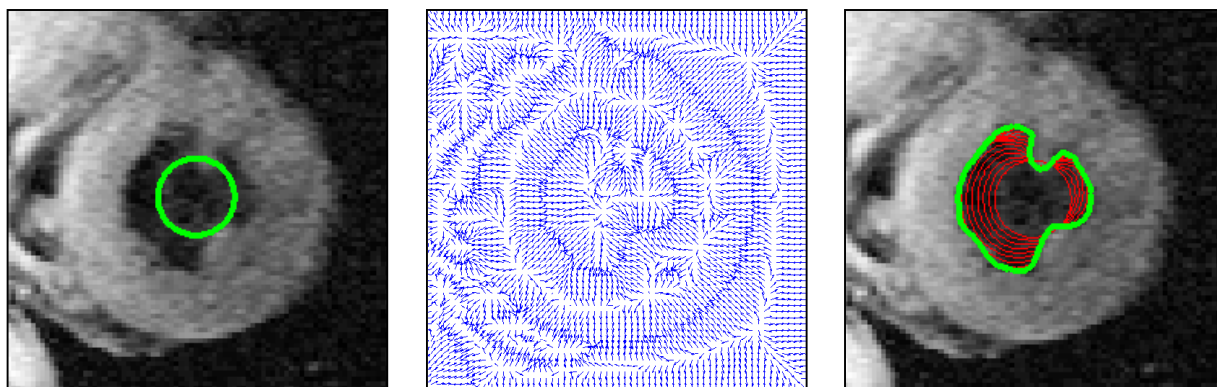


Fig. 12 – Modelul GGVF pe o imagine RMN a inimii.

2.4. Câmpul electric virtual (VEF)

Ideea generării unui câmp electric virtual (VEF – virtual electric field) este introdusă în [11]. Punctelor imaginii le sunt asociate sarcini electrice virtuale $Q(x,y)$ care au valoarea hărții de muchii $f(x,y)$ derivată din imaginea $I(x,y)$ conform relației (24):

$$Q(x,y) = f(x,y) \quad (36)$$

Câmpul electric virtual produs în poziția (x_0,y_0) de către o sarcină punctuală Q având coordonatele (x,y) este:

$$\mathbf{E}(x,y;x_0,y_0) = -\eta \frac{Q(x,y)}{r^2} \hat{\mathbf{r}} = -\eta \frac{Q(x,y)}{r^2} \left(\frac{x_0-x}{r} \hat{\mathbf{i}} + \frac{y_0-y}{r} \hat{\mathbf{j}} \right) \quad (37)$$

unde $r = \sqrt{(x_0-x)^2 + (y_0-y)^2}$ este distanța de la sarcina $Q(x,y)$ la punctul (x_0,y_0) în care se calculează câmpul electric, $\hat{\mathbf{r}}$ este vectorul unitar orientat dinspre punctul (x,y) către (x_0,y_0) , η este o constantă, iar semnul minus desemnează faptul că vectorii câmpului electric sunt orientați spre sarcina Q . Pe componente:

$$E_x(x,y;x_0,y_0) = -\eta \frac{(x_0-x)Q(x,y)}{r^3} \quad (38)$$

$$E_y(x,y;x_0,y_0) = -\eta \frac{(y_0-y)Q(x,y)}{r^3} \quad (39)$$

Câmpurile electrice se supun principiului superpoziției. Dacă într-o regiune \mathcal{D} sunt prezente mai multe sarcini, câmpul electric total din orice punct (x_0,y_0) este egal cu suma vectorială a câmpurilor electrice pe care fiecare sarcină le-ar crea în punctul (x_0,y_0) în absența tuturor celorlalte sarcini:

$$\mathbf{E}(x_0,y_0) = \sum_{(x,y) \in \mathcal{D}} \mathbf{E}(x,y;x_0,y_0) \quad (40)$$

Pe componente și efectuând înlocuirea conform relației (36):

$$\begin{aligned} E_x(x_0,y_0) &= \sum_{(x,y) \in \mathcal{D}} E_x(x,y;x_0,y_0) = \sum_{(x,y) \in \mathcal{D}} \frac{-\eta(x_0-x)}{r^3} f(x,y) = \\ &= \sum_{(x,y) \in \mathcal{D}} \frac{-\eta(x_0-x)}{((x_0-x)^2 + (y_0-y)^2)^{3/2}} f(x,y) = g_x(x_0,y_0) * f(x_0,y_0) \end{aligned} \quad (41)$$

respectiv:

$$E_y(x_0,y_0) = g_y(x_0,y_0) * f(x_0,y_0) \quad (42)$$

unde:

$$g_x(x,y) = -\frac{\eta x}{(x^2 + y^2)^{3/2}} = -\frac{\eta}{r^3} x \quad (43)$$

$$g_y(x,y) = -\frac{\eta y}{(x^2 + y^2)^{3/2}} = -\frac{\eta}{r^3} y \quad (44)$$

Relațiile (41) și (42) reduc calculul câmpului electric virtual la convoluția dintre harta de muchii $f(x,y)$ și măștile de convoluție $g_x(x,y)$, respectiv $g_y(x,y)$ precalculate cu relațiile (43), respectiv (44).

Forța electrică virtuală ce acționează asupra modelului de contur deformabil rezultă imediat din relațiile câmpului dacă se consideră domeniul \mathcal{D} extins la nivelul întregii imagini și fiecare punct al curbei deformabile înzestrat cu o sarcină electrică unitară și pozitivă q :

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = q\mathbf{E}(\mathbf{x}) \quad (45)$$

care apoi se introduce în relația (15) a modelului de contur deformabil ca un tip de forță externă statică.

Există multe asemănări între modelele VEF și GVF în privința convergenței în concavitățile obiectelor, extinderii domeniului de captare din jurul muchiilor, inițializării flexibile, toleranței la zgomot, integrării conturilor întrerupte, subiective și a punctelor împrăștiate.

Figura 13 exemplifică puterea câmpului electric virtual de a extinde influența muchiilor departe de frontiere, de a conduce conturul deformabil în concavitatea obiectelor și de a reconstitui informația discontinuă a conturilor întrerupte sau subiective.

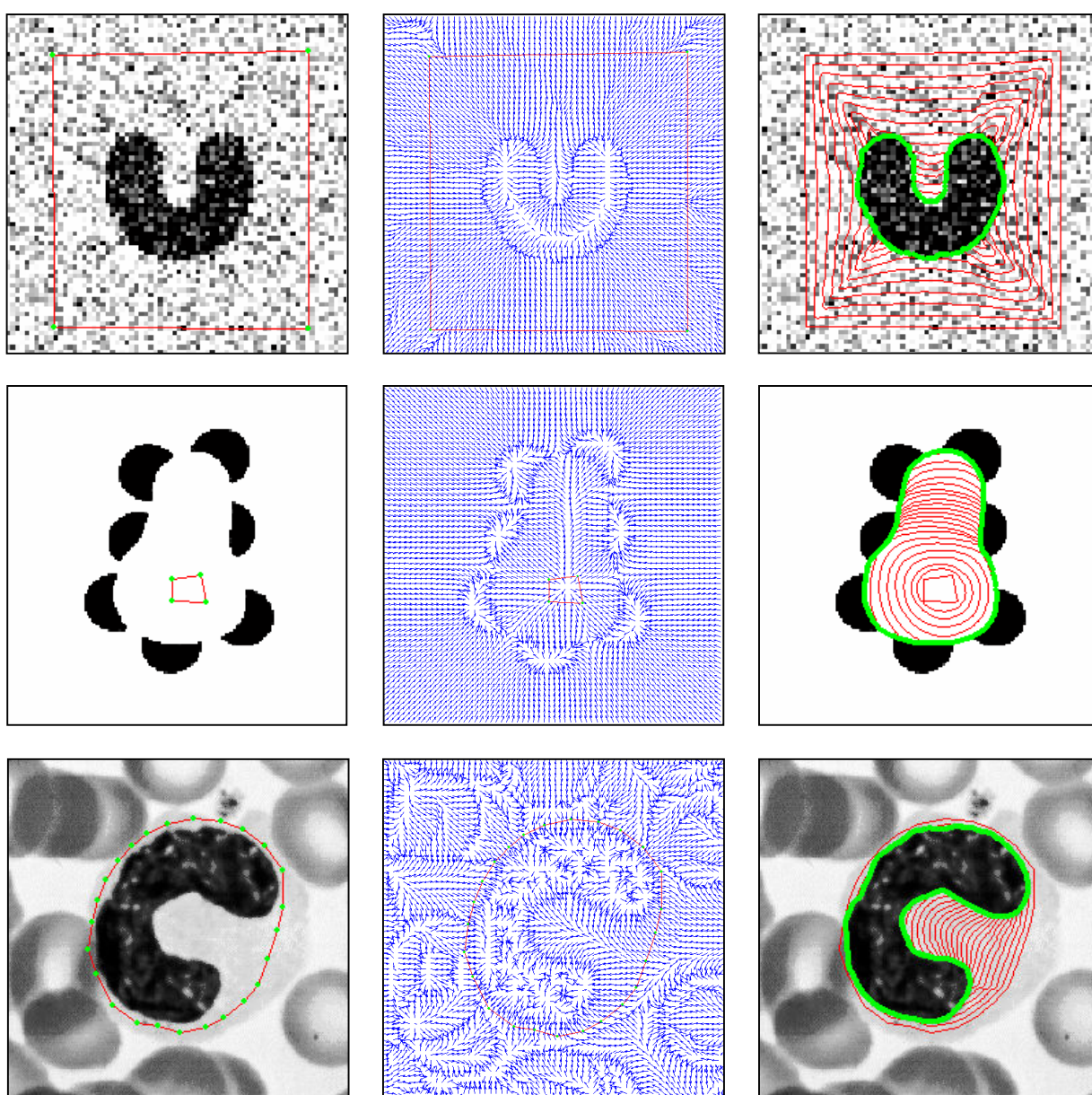


Fig. 13 – Inițializarea modelului VEF, câmpul de forțe și convergența în concavitatea obiectului.

2.5. Convoluția câmpului vectorial (VFC)

Convoluția câmpului vectorial (VFC – vector field convolution) a fost introdusă în [10] ca un nou tip de forță externă statică pentru modelele de contur deformabile. Ea se calculează prin convoluția liniară a unui nucleu de câmp vectorial cu harta de muchii derivată din imaginea cu niveluri de gri sau binară, apoi este introdusă în formularea dinamică prin forțe exprimate de relația (15).

Modelul VFC are un domeniu de captare larg în jurul muchiilor, o bună convergență în concavități, o modalitate rapidă de calcul, comportament bun în prezența zgomotului și, cel mai important avantaj comparativ cu modelele anterioare, flexibilitatea câmpului de forțe de a fi ușor de modelat pe o aplicație particulară și, prin urmare, de a modifica domeniul de captare din jurul muchiilor.

Mai întâi este definit un nucleu de câmp vectorial ai cărui vectori sunt orientați spre originea nucleului:

$$\mathbf{k}(x,y) = m(x,y)\mathbf{n}(x,y) \quad (46)$$

unde $m(x,y)$ este mărimea vectorului din poziția (x,y) și $\mathbf{n}(x,y)$ este vectorul unitar orientat spre originea nucleului, $(0,0)$:

$$\mathbf{n}(x,y) = [-x/r, -y/r] \quad (47)$$

cu o excepție în origine unde $\mathbf{n}(0,0) = [0,0]$, iar $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ este distanța de la origine.

Acest nucleu de câmp vectorial are proprietatea că o particulă liberă plasată în câmp se va deplasa spre originea nucleului (care este diferită de originea imaginii sau a hărții de muchii). Dacă se consideră originea nucleului situată în dreptul unui punct al muchiei, particula se va deplasa spre acea muchie.

Forța externă VFC, $\mathbf{f}_{\text{vfc}}(x,y) = [u_{\text{vfc}}(x,y), v_{\text{vfc}}(x,y)]$, se obține din convoluția nucleului de câmp vectorial $\mathbf{k}(x,y)$ cu harta de muchii $f(x,y)$ generată din imaginea $I(x,y)$:

$$\mathbf{f}_{\text{vfc}}(x,y) = f(x,y) * \mathbf{k}(x,y) = [f(x,y) * u_k(x,y), f(x,y) * v_k(x,y)] \quad (48)$$

Întrucât harta de muchii are valori non-negative și mai mari în dreptul muchiilor din imagine, acestea vor contribui mai mult la generarea forțelor decât regiunile omogene. Prin urmare, particulele libere vor fi atrase către muchii.

Câmpul VFC depinde foarte mult de mărimea vectorilor nucleului de câmp $m(x,y)$. Prin analogie cu câmpul electric și gravitațional, se consideră că influența muchiilor ar trebui să descrească pe măsură ce particula se află mai departe, astfel încât în [10] este propusă următoarea funcție ce controlează mărimea câmpului:

$$m(x,y) = 1/r^\gamma \quad (49)$$

cu $m(0,0) = 0$, unde γ este un parametru ce controlează descreșterea. Influența muchiilor crește pe măsură ce γ scade.

Principiul de funcționare este ilustrat în figura 14 din care se constată capacitatea modelului VFC de a depăși muchiile false. Aceasta este o caracteristică extrem de utilă atunci când imaginile de segmentat sunt afectate de zgomot ori se dorește extragerea unor trăsături principale și eliminarea celor secundare.

Prin contrast, în figura 15 se consideră același obiect și aceeași inițializare a conturului deformabil, însă scopul urmărit este cel contrar, anume captarea detaliilor fine.

Explicația celor două rezultate diferite decurge din modificarea efectului muchiilor la distanță prin modificarea parametrului γ . Rezultă faptul că parametrul γ are un efect de netezire, cu atât mai pronunțat cu cât valoarea sa este mai mică, aspect deosebit de important pentru aplicații.

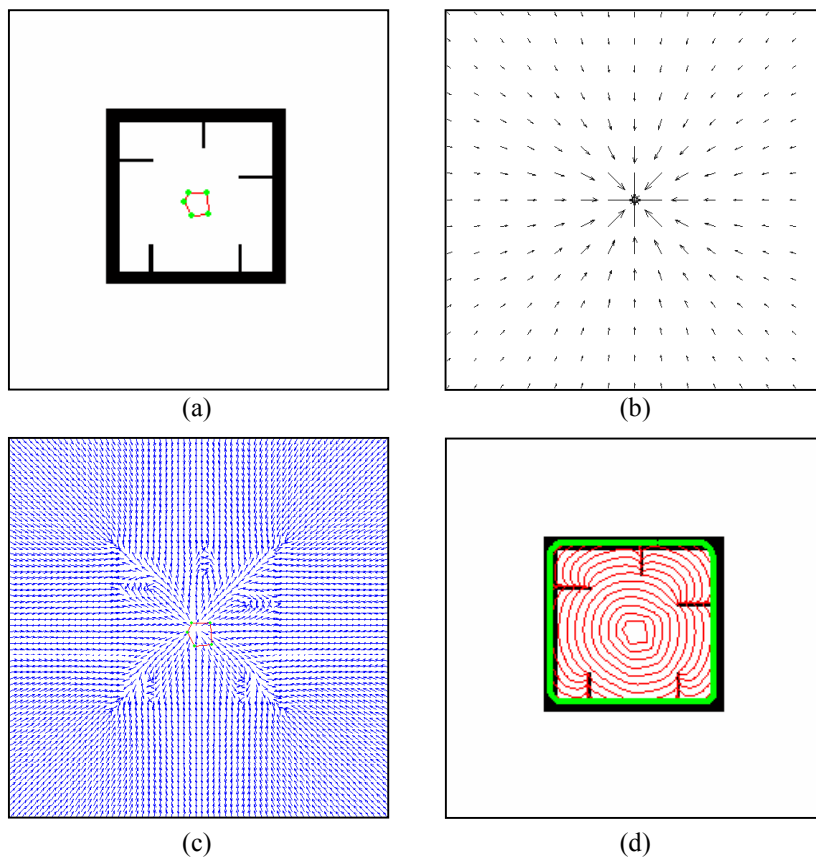


Fig. 14 – (a) Inițializarea modelului VFC, (b) Nucleul de câmp vectorial, (c) Câmpul de forțe ($\gamma = 2$) și (d) Evoluția modelului peste muchiile false.

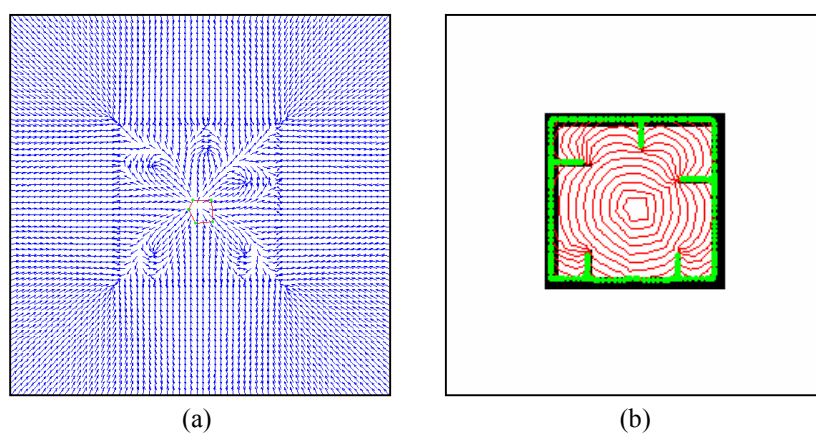


Fig. 15 – (a) Câmpul de forțe ($\gamma = 4$) și (b) Captarea detaliilor fine.

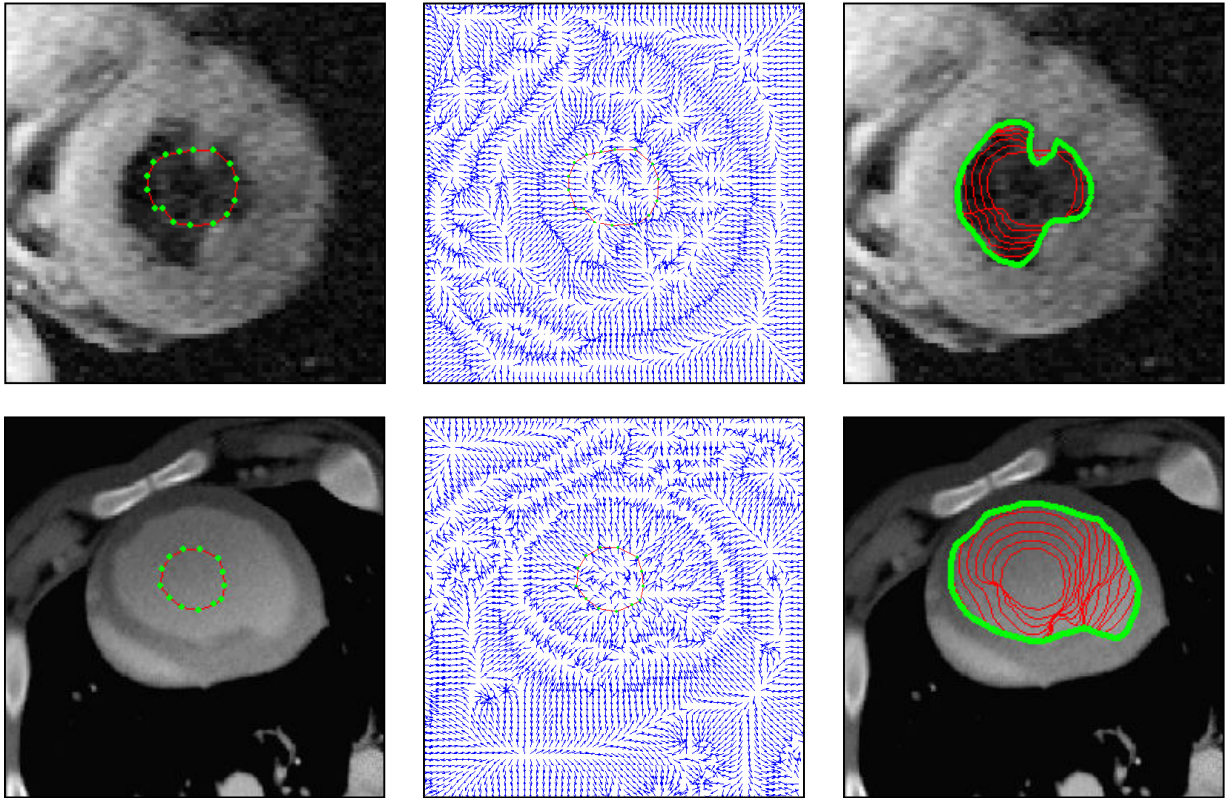


Fig. 16 – Modelul VFC pe imagini RMN ale inimii.

Funcția ce controlează mărimea câmpului poate fi modificată pentru a furniza un câmp orientat prin includerea unei direcții de deplasare. Funcția de mărime modificată anizotropică este:

$$m_a(x,y) = c_a(x,y)m(x,y) \quad (50)$$

unde $c_a(x,y)$ este factorul anizotropic definit ca

$$c_a(x,y) = 1 / [2 - \mathbf{d} \cdot \mathbf{n}(x,y)] \quad (51)$$

unde \mathbf{d} este un vector unitar ce reprezintă direcția de deplasare, iar \cdot simbolizează produsul scalar.

Dacă $\mathbf{n}(x,y)$ și \mathbf{d} au aceeași direcție, $c_a(x,y)$ este apropiat de 1. Dacă $\mathbf{n}(x,y)$ și \mathbf{d} au direcții opuse, $c_a(x,y)$ este apropiat de 1/3. Prin urmare, câmpul VFC rezultat este deplasat în direcția \mathbf{d} .

3. Sisteme dedicate

Acest capitol este dedicat doar enumerării aplicațiilor în care contururile deformabile au fost folosite. Imediat după apariția lor, modelele de contur deformabile au devenit un instrument indispensabil pentru imagistica medicală și nu numai. Mulțimea de extensii, dezvoltări pentru diverse aplicații sau sisteme specifice este imposibil de circumscris. În continuare sunt amintite câteva dintre acestea.

În imagistica medicală modelele deformabile se folosesc pentru elaborarea metodelor de segmentare automată din imagini RMN, CT, radiografice sau fotografice a ficatului, plămânilor, miocardului, oaselor, plăcii cerebrovasculare, cromozomilor sau a nucleelor celulelor și, de asemenea, pentru diagnoza cancerului de sân sau reconstrucția cortexului cerebral uman din imaginile RMN.

Modelele de contur deformabile cu adaptabilitate topologică oferă posibilități extinse de segmentare automată a celor mai complexe forme ale structurilor biologice cum sunt vasele de sânge ale retinei, structurile cerebrale (corpus callosum, materia albă, cerebelul, neuroni), vertebrele, ventriculele inimii. Modelele de contur sunt utilizate pe scară largă la construirea sistemelor de urmărire a mișcării în timp real, cu aplicații speciale în imagistica medicală la urmărirea mișcării leucocitelor, proteinelor, marginilor vaselor sangvine, valvei mitrale, miocardului, ventriculului stâng, limbii, ochilor.

În biometrie, modelele de contur deformabile servesc la detecția automată a trăsăturilor și conturului feței, potrivirea și urmărirea mișcării buzelor, recunoașterea irisului, identificarea indivizilor pe baza radiografiilor dentare, recunoașterea vorbirii din informația vizuală.

Contururile deformabile sunt utilizate de asemenea pentru extracția clădirilor din imagini satelitare, pentru extracția liniilor de nivel din hărțile topografice, chiar și pentru segmentarea liniilor de text curbate din documentele deformate prin copiere.

O clasă aparte de aplicații se referă la detecția și localizarea pietonilor, care este un subiect de interes atât pentru organizațiile militare, cât și pentru cele comerciale.

4. Segmentarea obiectelor puternic non-convexe

O provocare pentru modelele de contur deformabile în reprezentare parametrică o constituie segmentarea obiectelor puternic non-convexe (cele de tip potcoavă), pentru care direcția normalei la contur se schimbă cu mai mult de 180° între două puncte de inflexiune succesive [5].

Dintre toate tipurile prezentate anterior, doar acelea ce înglobează forțele de presiune sunt capabile să abordeze complet astfel de trăsături. Dificultatea de alegere a parametrilor care să conducă la o bună manevrabilitate și stabilitate a modelului corelată cu eventuale discontinuități ale muchiilor prin care conturul trece datorită acțiunii forțelor de presiune a făcut ca atenția cercetătorilor să se concentreze asupra altor tipuri de forțe.

Câmpul GVF formează la intrarea în concavitate o zonă în care forțele sunt orientate în direcții opuse și în dreptul căreia modelul se va opri dacă este inițializat în exteriorul concavității (Fig. 17).

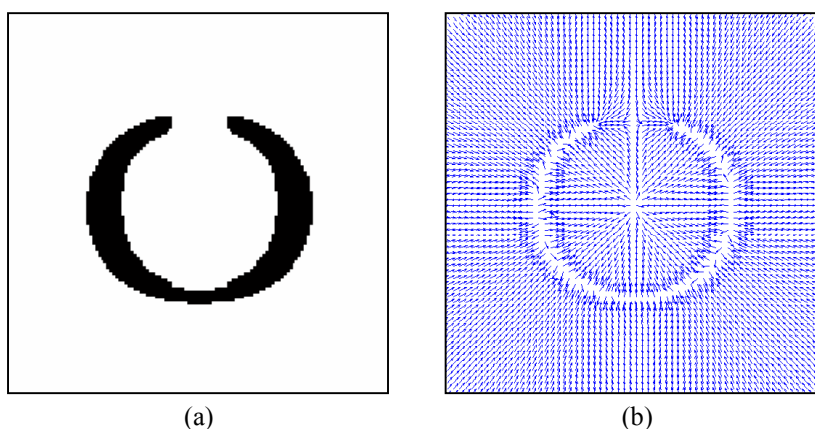


Fig. 17 – (a) Un obiect puternic non-convex și (b) Câmpul GVF corespondent.

Incapacitatea modelului GVF de a obține frontiera obiectului în acest gen de situații a devenit o provocare și a făcut ca multe din eforturile ulterioare să se concentreze asupra găsirii altor soluții. Acestea s-au axat fie pe introducerea forței GVF într-o combinație care să conducă la obținerea unei rezultante ce permite accesul în concavitățile pronunțate, fie pe elaborarea altor modele construite pe alte principii, dar care să ofere performanțe similare cu cele ale modelului GVF.

Un comportament asemănător cu cel al GVF în fața frontierelor puternic non-convexe este prezentat și de modelele GGUF, VEF sau VFC.

4.1. Soluțiile existente pentru abordarea obiectelor puternic non-convexe

În [5] este introdusă curgerea vectorilor curbura (CVF – Curvature Vector Flow) ca un nou tip de forță, modelul FFA (Force Field Analysis) este propus în [6], modelul BVF (Boundary Vector Field – câmpul vectorial al frontierei) în [15], iar modelul FVF (Fluid Vector Flow – Curgerea Vectorilor Fluidului) în [20].

Toate aceste metode fie sunt obligate să folosească hărți de muchii continue, fie întâmpină dificultăți atunci când sunt aplicate imaginilor afectate de zgomot, în special impulsiv. În secțiunile următoare sunt prezentate extensii ale modelelor GVF/GGUF și VFC care permit abordarea naturală a obiectelor puternic non-convexe și care sunt elaborate de autor.

4.2. Extensia modelelor GVF/GGUF

4.2.1. Contextul matematic

Toate îmbunătățirile care au fost realizate până în prezent cu scopul facilitării analizei obiectelor puternic non-convexe implică folosirea unui aparat matematic auxiliar celui specific modelului GVF sau complet diferit de acesta.

Pe de o parte aceste modele alternative se bazează pe mecanisme situate în afara cadrului conceptual original al modelului GVF, iar pe de altă parte performanțele lor sunt depășite de cele ale GVF acolo unde acesta este aplicabil cu succes.

Mai mult decât atât, în [5] se menționează explicit că formele puternic non-convexe nu pot fi abordate de către modelele GVF/GGUF întrucât nici o tehnică nu va înlătura zona de la intrarea în concavitatea acestora în care forțele sunt orientate în direcții opuse.

De asemenea, se consideră că această situație este inerentă în cazul modelelor GVF și GGUF, deoarece ele se bazează pe un proces liniar izotrop (difuzia căldurii) care determină apariția unei astfel de zone atunci când obiectul este puternic non-convex.

În acest context, soluția capătă o relevanță specială [13].

4.2.2. Esența metodei

Așa cum a fost specificat în secțiunea 2.2., întreaga abordare GVF are ca rezultat o extindere a gradientului hărții de muchii ∇f departe de muchii și în regiunile omogene, utilizând un proces de difuzie care alimentează un anumit gen de competiție între vectorii corespunzători frontierei din care vor rezulta unii orientați spre concavitățile regiunilor.

Câmpul GVF rezultat va avea atât o componentă irotatională (fără rotor), cât și una solenoidală (fără divergență), în timp ce gradientul hărții de muchii este un câmp irotational (deoarece este gradientul unei funcții scalare $-E_{ext}$). În figura 18 este prezentat un obiect non-convex, gradientul hărții de muchii și câmpul GVF corespondent.

Rezumând, GVF este construit printr-un proces de difuzie a vectorilor gradientului hărții de muchii derivată din imagine. Acest proces de difuzie poate fi privit ca un mecanism având la intrare vectorii gradientului hărții de muchii, iar la ieșire câmpul GVF rezultat. Prin urmare, ecuația (30) poate fi reprezentată la fel ca în figura 19.

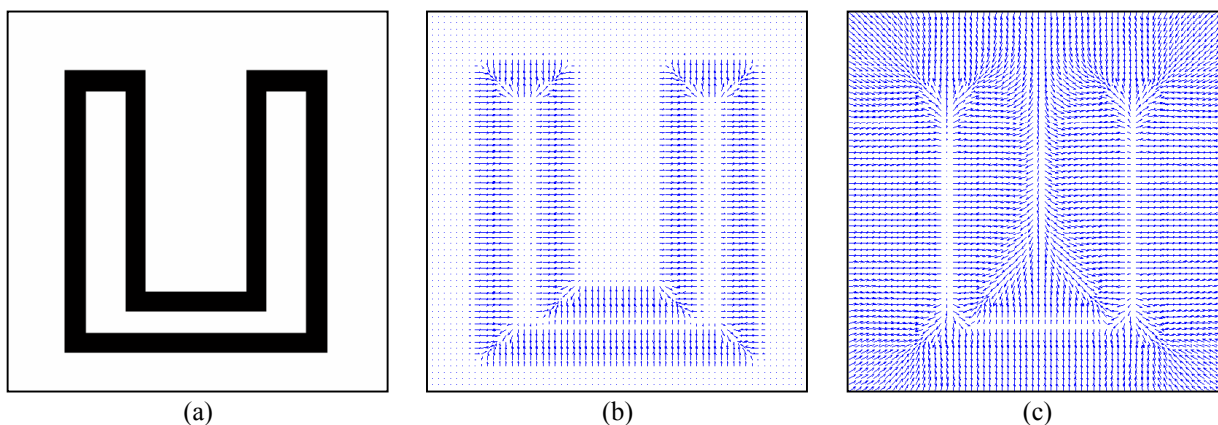


Fig. 18 – (a) Un obiect non-convex; (b) Gradientul hărții de muchii, ∇f ; (c) Câmpul GVF.

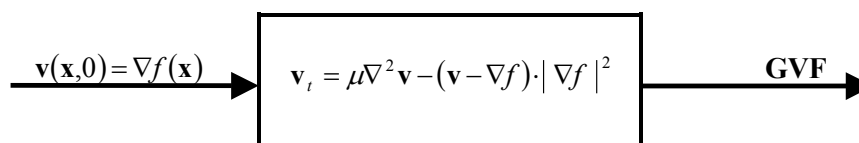


Fig. 19 – Mecanismul de difuzie.

Dacă readucem în discuție faptul că intrarea este un câmp irotational, iar ieșirea un câmp având atât o componentă irotatională, cât și una solenoidală, devine simplu de privit întregul mecanism ca unul ce transformă un câmp irotational într-unul având ambele componente și pe care apoi îl difuzează.

Într-o astfel de interpretare, apar imediat două întrebări:

- 1) Ce efect va avea la ieșire o forță de intrare conținând atât o componentă irotatională, cât și una solenoidală?
- 2) Cum poate fi construită o astfel de forță de intrare?

4.2.3. Câmpul GVF extins

În cele ce urmează, vom păstra neschimbată structura matematică a GVF. Noutatea abordării este de a înlocui intrarea în acest mecanism cu o cantitate mai potrivită decât gradientul hărții de muchii și anume cu un câmp ce are atât o componentă irotațională, cât și una solenoidală.

Ideea despre cum se poate construi o astfel de intrare este preluată din [12], respectiv ca o combinație convexă între gradientul hărții de muchii și o altă forță ortogonală pe acesta și derivată din el cu ajutorul unui estimat al curburii locale a frontierei obiectului.

Pașii pentru construirea acestei forțe sunt următorii [12]: În primul rând, se va adăuga o componentă solenoidală peste cea irotațională existentă. În al doilea rând, această componentă ar trebui să fie zero ori de câte ori ∇f este zero pentru a evita perturbarea conturului de echilibru. În al treilea rând, această componentă trebuie să fie orientată spre extremitatea regiunii concave a frontierei, o trăsătură definită prin intermediul curburii frontierei obiectului. Prin urmare, această componentă ar trebui să utilizeze în definiția ei o măsură a curburii frontierei. În figura 20(a) este prezentat un obiect concav pentru care se consideră harta de muchii dată de $f = |\nabla(G_\sigma * I)|$, iar vectorii gradientului hărții de muchii sunt dați de ∇f (figura 20(b)). Fie ∇f^\perp rotația în sens contrar acelor de ceasornic a lui ∇f . Așa cum reiese din figura 20(c), ∇f^\perp este un câmp solenoidal cu vectorii orientați de-a lungul frontierei, unii orientați înspre regiunea concavă, alții orientați dinspre regiunea concavă spre exterior.

O expresie aproximativă a curburii locale [12] a frontierei este dată de:

$$\kappa_l = \frac{f_2^2 f_{11} + f_1^2 f_{22} - 2f_1 f_2 f_{12}}{(f_1^2 + f_2^2)^{3/2}} \quad (52)$$

unde $f_1, f_2, f_{11}, f_{22}, f_{21}, f_{12}$ sunt derivatele parțiale de ordinul întâi, respectiv al doilea ale hărții de muchii f .

Vectorii gradientului curburii locale $\nabla \kappa_l$ sunt orientați spre concavitate (figura 20(d)) și ei sunt folosiți pentru a roti vectorii ∇f^\perp atunci când aceștia sunt orientați dinspre concavitate spre exterior. Pentru a face aceasta, se definește $\phi = \text{sgn}(\langle \nabla f^\perp, \nabla \kappa_l \rangle)$ unde ϕ va fi +1 atunci când vectorii formează un unghi ascuțit și -1 atunci când ei formează un unghi obtuz. Componenta solenoidală finală este apoi dată de (figura 20(e)): $\mathbf{f}_s = \phi \nabla f^\perp$. În final, forța de intrare modificată \mathbf{f}_{im} este construită ca o combinație convexă între \mathbf{f}_s și ∇f , $\mathbf{f}_{im} = \tau \nabla f + (1 - \tau) \mathbf{f}_s$, unde $\tau \in [0, 1]$, așa cum se arată în figura 20(f).

Prin utilizarea lui \mathbf{f}_{im} în locul lui ∇f în relația (30), câmpul GVF rezultat poate conduce modelul de contur deformabil în interiorul frontierelor puternic non-convexe cum sunt cele din figura 17.

Relația generalizată de difuzie pentru câmpul GVF devine:

$$\mathbf{v}_t = \mu \nabla^2 \mathbf{v} - (\mathbf{v} - \mathbf{f}_{im}) \cdot |\mathbf{f}_{im}|^2 \quad (53)$$

cu condiția inițială $\mathbf{v}(\mathbf{x}, 0) = \mathbf{f}_{im}(\mathbf{x})$. Așadar, se păstrează neschimbată structura matematică a GVF, iar noutatea propusă revelează capacitatea neașteptată a modelului GVF de a aborda frontierele puternic non-convexe. Această abilitate poate fi văzută ca o proprietate ascunsă a procesului de difuzie GVF.

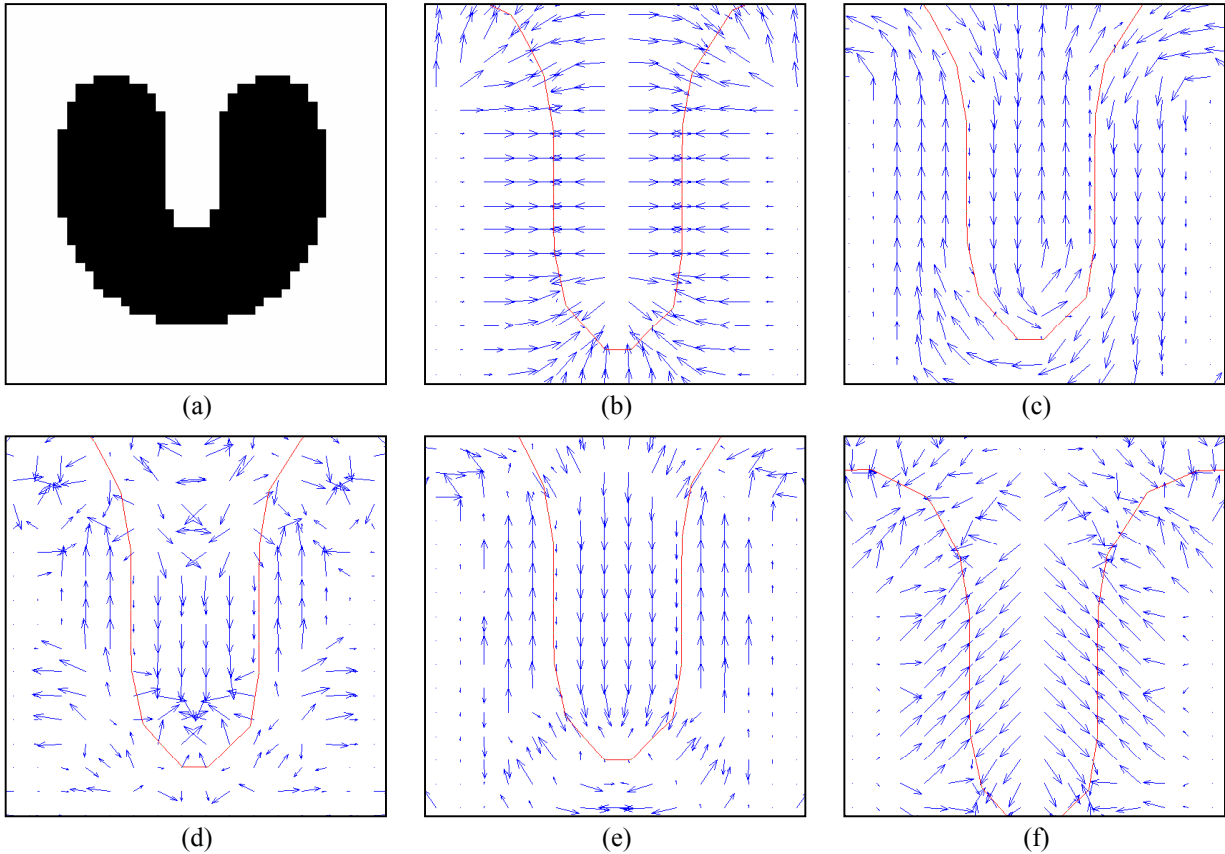


Fig. 20 – (a) Un obiect concav; (b)-(f) Prim-plan în: (b) Gradientul hărții de muchii ∇f ; (c) Gradientul rotit ∇f^\perp ; (d) Gradientul curburii locale $\nabla \kappa_l$; (e) Câmpul solenoidal \mathbf{f}_s ; (f) Forța de intrare modificată \mathbf{f}_{im} (toate prim-planele au suprapus conturul aproximativ).

Figura 21 prezintă rezultatele obținute în cazul unor obiecte de tip potcoavă cu diferite deschideri.

Dacă privim simultan figura 20(f) și figura 21 am putea crede că efectul metodei propuse constă într-o operație de înclinare a vectorilor gradientului hărții de muchii care mai apoi sunt propagați de către mecanismul de difuzie specific GVF. Pentru a arăta că lucrurile sunt mai complicate decât ne-am fi așteptat, prezentăm în figura 22 etapele de construire a intrării \mathbf{f}_{im} pentru primul obiect din figura 21.

În figura 22(e) este prezentat un prim-plan în câmpul solenoidal și se vede că într-o vecinătate extrem de mică există vectori cu orientări opuse, iar din figura 22(f), unde este prezentată forța de intrare modificată \mathbf{f}_{im} , se vede că într-o aceeași vecinătate găsim vectori care au orientări divergente (unul orientat ascendent, iar celălalt descendent). Aceasta arată în mod evident că efectul global nu este doar unul de înclinare urmat de difuzie. Figura 23 arată unele etape ale difuziei forței de intrare modificată \mathbf{f}_{im} în funcție de numărul de iterații.

Comportamentul subliniază încă o dată că procesul de difuzie specific GVF generează o competiție între vectorii corespunzători frontierei care, printr-un număr de iterații succesive, are ca rezultat final expulzarea vectorilor câmpului din zona concavă în exterior.

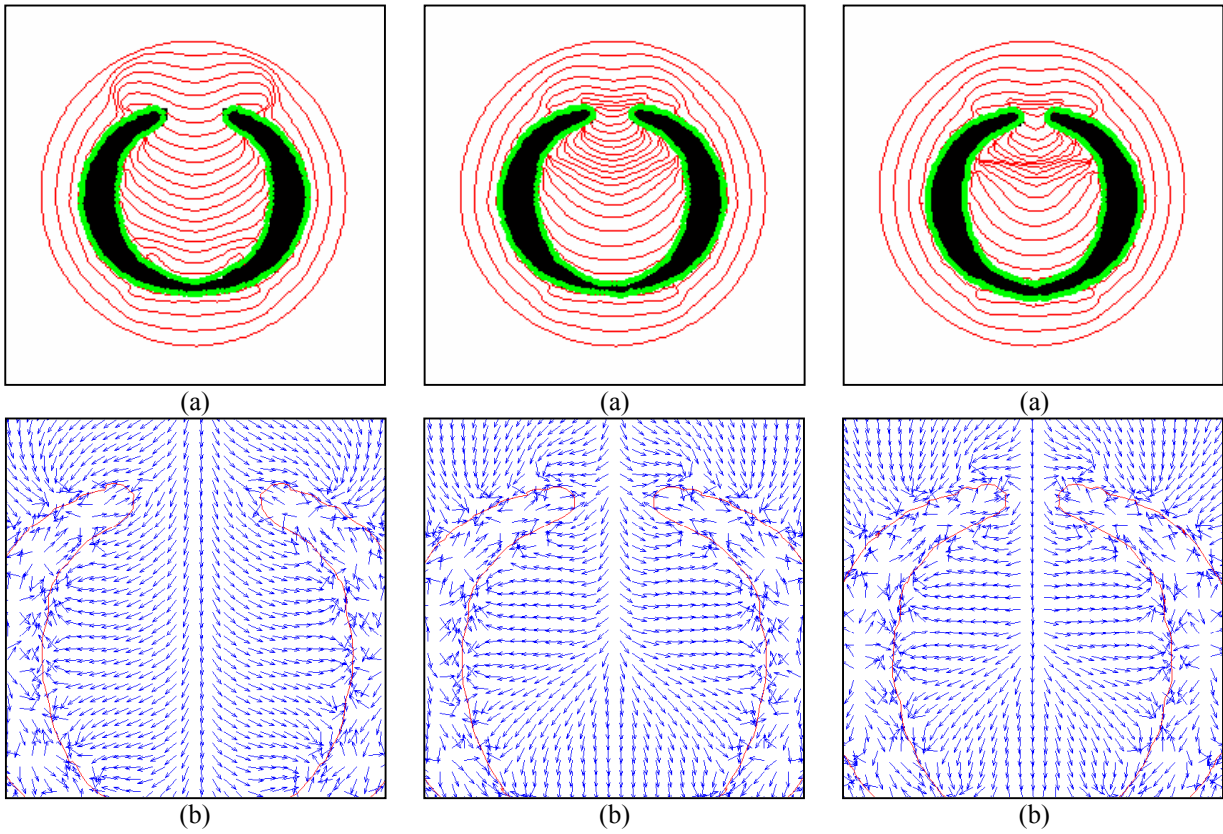


Fig. 21 – (a) Un obiect de tip potcoavă cu deschiderea de 18, 11, respectiv 7 pixeli și curba deformabilă evoluând prin deschidere; (b) O porțiune mărită a câmpului GVF extins cu conturul final suprapus.

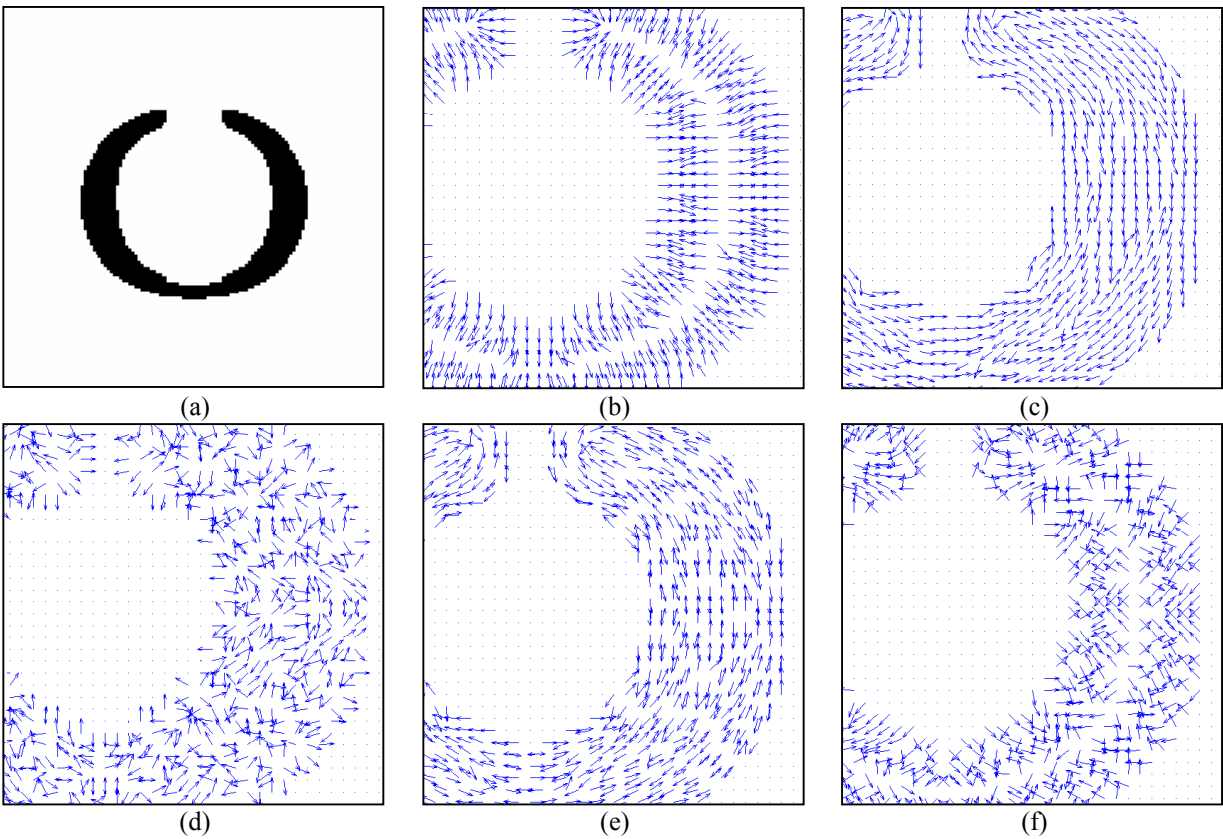


Fig. 22 – Etapele de construire a forței de intrare \mathbf{f}_{im} pentru un obiect puternic non-convex (a). (b)-(f) Prim-plane în: (b) Gradientul hărții de muchii ∇f ; (c) Gradientul rotit ∇f^\perp ; (d) Gradientul curburii locale $\nabla \kappa_l$; (e) Câmp solenoidal \mathbf{f}_s ; (f) Forța de intrare modificată \mathbf{f}_{im} .

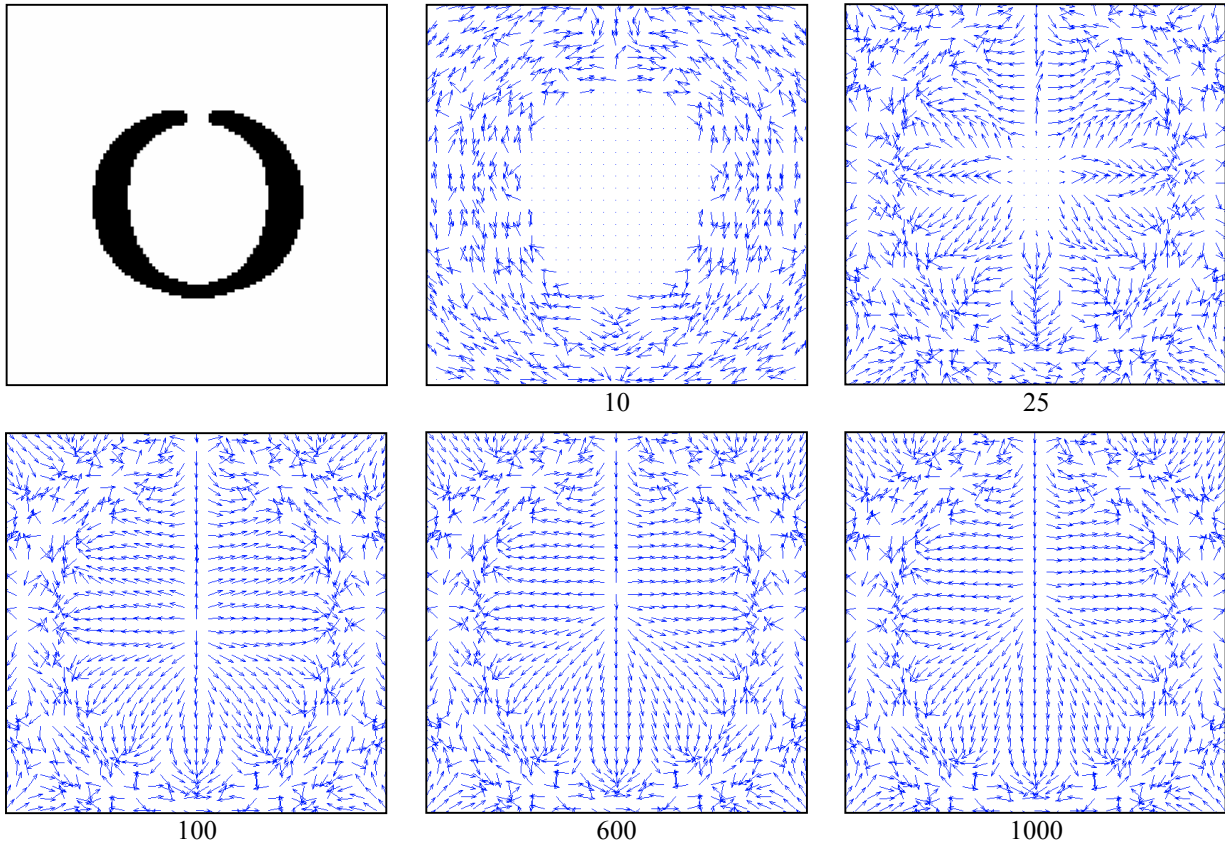


Fig. 23 – Prim-plane ale etapelor difuziei.

4.2.4. Câmpul GGVF extins

Dacă în relația (33) se utilizează \mathbf{f}_{im} în locul lui ∇f , se obține relația generalizată de difuzie pentru câmpul GGVF:

$$\mathbf{v}_t = g(|\mathbf{f}_{im}|) \nabla^2 \mathbf{v} - h(|\mathbf{f}_{im}|) \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{f}_{im}) \quad (54)$$

cu condiția inițială $\mathbf{v}(\mathbf{x}, 0) = \mathbf{f}_{im}(\mathbf{x})$ și funcțiile de ponderare $g(|\mathbf{f}_{im}|) = e^{-(|\mathbf{f}_{im}|/K)^2}$ și $h(|\mathbf{f}_{im}|) = 1 - g(|\mathbf{f}_{im}|)$ controlate de parametrul K .

4.2.5. Aplicații

În figura 24 este aplicat modelul GVF extins pe imagini reale cu niveluri de gri.

Se constată faptul că modelul GVF extins are o capacitate mai mare de a integra informația referitoare la contur prin aceea că include în algoritm date suplimentare prin intermediul curburii locale.

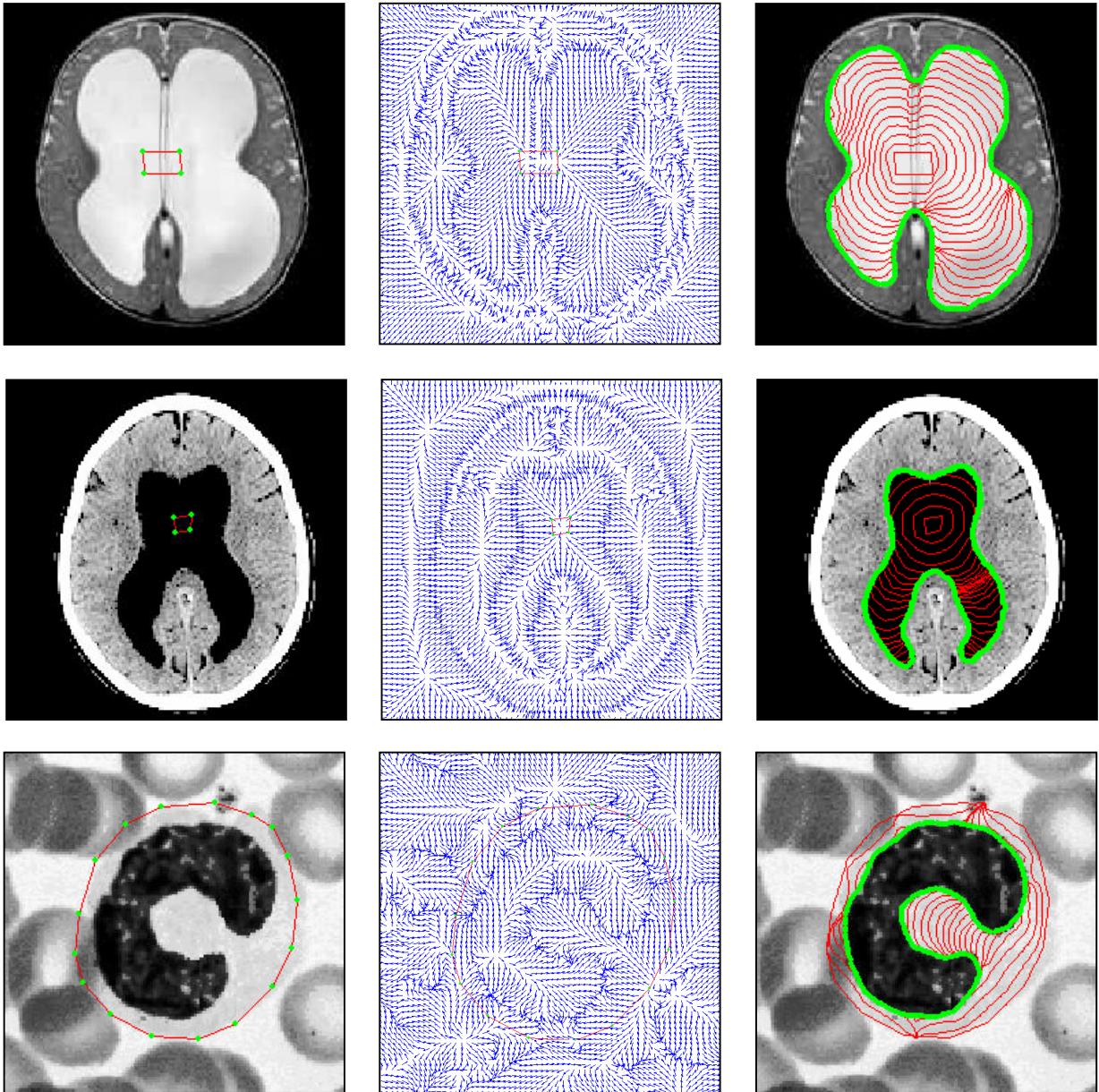


Fig. 24 – Modelul GVF extins.

4.3. Extensia modelului VFC

În secțiunea 2.5. au fost prezentate unele considerații privind influența parametrului γ asupra comportamentului modelului. Variația acestuia are un efect deosebit asupra structurii câmpului, iar în ceea ce privește obiectele puternic non-convexe relevanța este specială.

Figura 25 arată efectul scăderii parametrului γ asupra structurii câmpului VFC produs de un obiect puternic non-convex. Se observă că, pentru o valoare suficient de mică, se obțin vectori ai câmpului capabili să conducă modelul de contur deformabil în concavitate.

În același timp însă, pentru această valoare, efectul muchiilor este puternic netezit, iar curba deformabilă va trece peste acelea mai slabe. Harta de muchii utilizată este $f = |\nabla I|$, așadar netezirea se datorează numai parametrului γ , un efect specific câmpului VFC, studiat în secțiunea 2.5.

În cazul imaginilor afectate de zgomot va fi necesară o netezire suplimentară a imaginii prin convoluția cu funcția Gaussiană și utilizarea hărții de muchii $f = |\nabla(G_\sigma * I)|$, iar cele două efecte – vectorii câmpului VFC orientați în concavitate și preservarea muchiilor – nu vor mai putea fi obținute întotdeauna simultan.

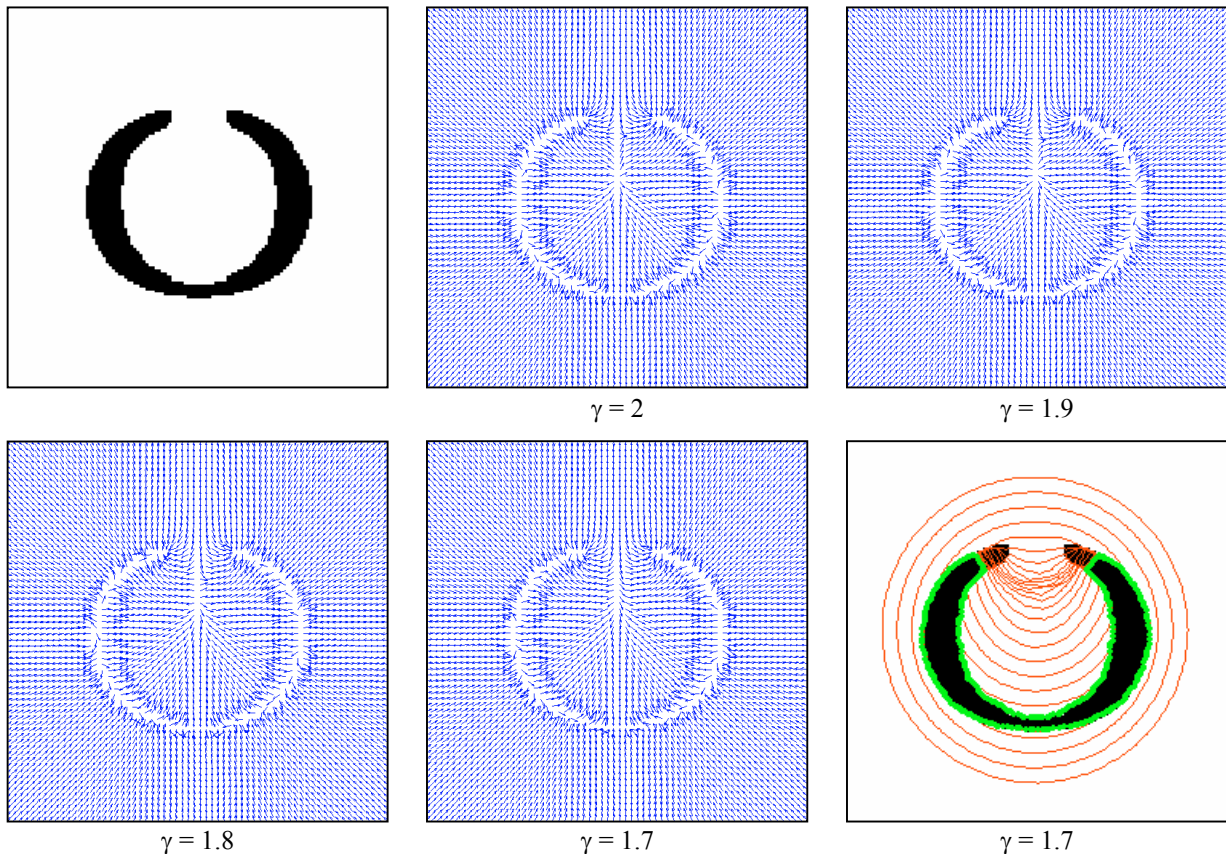


Fig. 25 – Influența parametrului γ asupra structurii câmpului unui obiect puternic non-convex.

Un caz aparte este cel al concavităților înguste și adânci pentru care nu se pot obține forțe capabile să conducă modelul în concavitate, indiferent de valorile parametrului γ . În partea superioară a concavității vectorii câmpului au o componentă descendentă, iar în partea inferioară una ascendentă, astfel încât curba deformabilă se va opri la mijlocul concavității. Valoarea lui γ are efect doar asupra gradului de înclinare a acestor vectori, așa cum se arată în figura 26.

Soluția prezentată în [14] arată că proprietatea câmpului VFC de a putea fi modelat în mod anizotrop este utilizabilă pentru a conduce vectorii din interiorul concavității către exteriorul ei, chiar la valori mari ale parametrului γ . De asemenea, este propus un mecanism condus de imagine pentru a genera această modelare a câmpului.

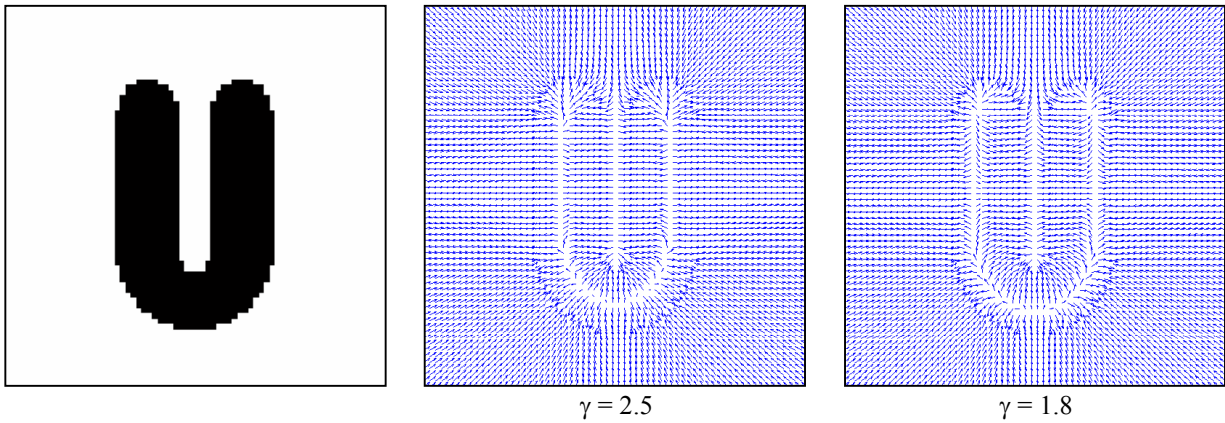


Fig. 26 – Influența parametrului γ asupra structurii câmpului în concavitatea îngustă și adâncă.

4.3.1. Modelarea anizotropică determinată de imagine

Modelarea anizotropică a câmpului VFC este descrisă în secțiunea 2.5. și constă în atenuarea sau amplificarea funcției de mărime a câmpului cu factorul anizotropic $c_a(x, y) = 1/[2 - \mathbf{d} \cdot \mathbf{n}(x, y)]$, unde vectorul \mathbf{d} reprezintă direcția de deplasare.

Folosim această trasătură pentru a conduce vectorii câmpului VFC în afara concavității obiectului puternic non-convex, așa cum se arată în figura 27 unde a fost utilizat un vector \mathbf{d} orientat vertical în jos.

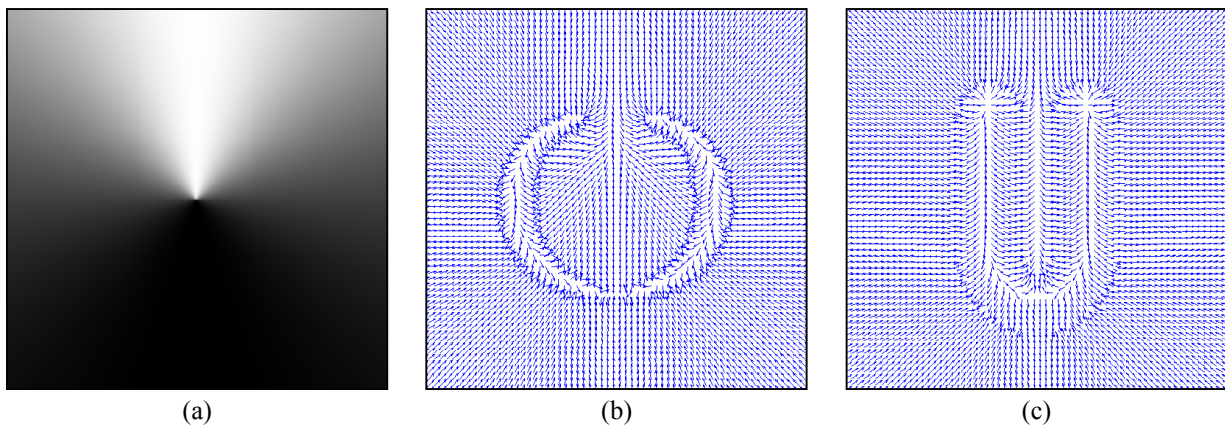


Fig. 27 – (a) Factorul anizotropic pentru vectorul \mathbf{d} orientat vertical în jos;
(b, c) Câmpul VFC deplasat în afara concavității.

Imediat apare următoarea întrebare: cum s-ar putea obține din imagine o informație despre direcția concavității? Altfel spus, cum poate fi dedus din imagine vectorul \mathbf{d} și, implicit, factorul anizotropic $c(x, y)$?

Mecanismul propus în cele ce urmează generează acest rezultat și începe cu constatarea că, în principiu, orice cantitate obținută din imagine ar putea fi influențată în mod local de către conținutul imaginii. Prin urmare, o posibilitate ar fi extragerea unei hărți de vectori de deplasare $\mathbf{d}(x, y)$ în locul unui vector \mathbf{d} unic pentru întreaga imagine. Această tranziție conceptuală de la vectorul deplasare \mathbf{d} unic la harta de vectori de deplasare $\mathbf{d}(x, y)$ produce o extensie a ideii inițiale de modelare anizotropică a

câmpului în combinație cu următoarea observație: relația (48) arată că vectorii câmpului VFC se obțin din convoluția hărții de muchii $f(x,y)$ cu nucleul de câmp vectorial $\mathbf{k}(x,y)$, iar dacă în această relație introducem imaginea netezită în locul hărții de muchii se va obține o hartă de vectori de deplasare:

$$\mathbf{d}(x,y) = (G_{\sigma_1} * I) * \mathbf{k}(x,y) \quad (55)$$

Urmatorul pas constă în utilizarea hărții de vectori de deplasare pentru a genera factorul anizotrop și câmpul VFC extins în conformitate cu relațiile (46)-(51):

$$c_a(x,y) = 1 / [2 - \mathbf{d}(x,y) \cdot \mathbf{n}(x,y)] \quad (56)$$

$$m_a(x,y) = c_a(x,y)m(x,y) \quad (57)$$

$$\mathbf{k}_1(x,y) = m_a(x,y)\mathbf{n}(x,y) \quad (58)$$

$$\mathbf{f}_{\text{vfc2}}(x,y) = f(x,y) * \mathbf{k}_1(x,y) \quad (59)$$

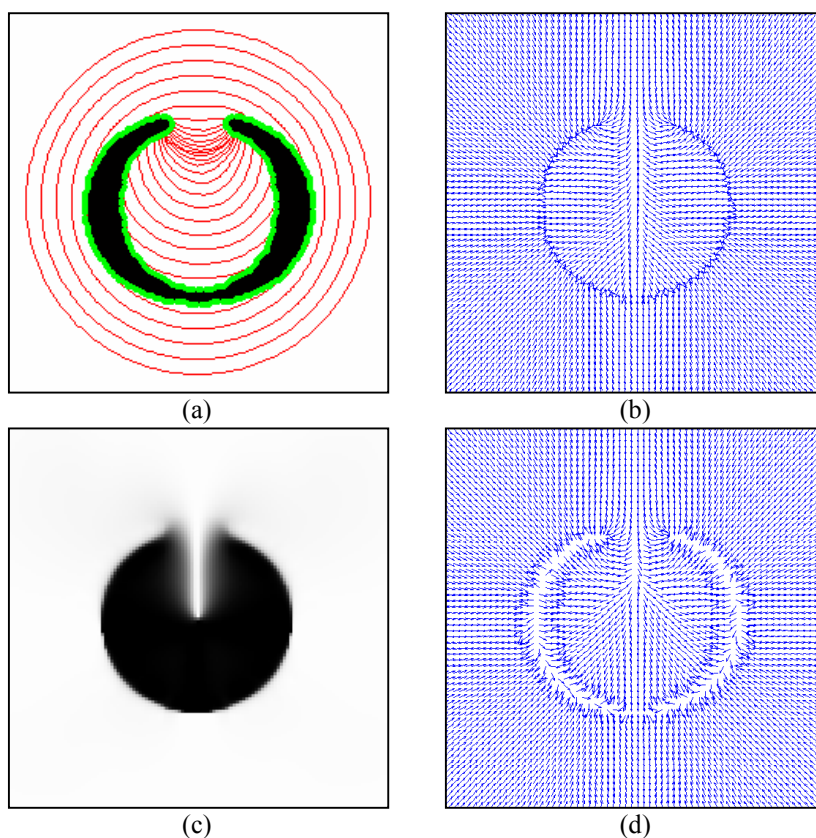


Fig. 28 – (a) Evoluția modelului (b) Harta de vectori de deplasare;
(c) Factorul anizotrop; (d) Câmpul VFC extins.

4.3.2. Aplicații

Figurile 29 și 30 arată abilitatea modelului VFC extins combinat de a segmenta obiecte puternic non-convexe. Combinând adecvat efectele de netezire și de preservare a muchiiilor, inițializarea curbei deformabile se poate face departe de structura de interes și nu este restricționată de prezența structurilor secundare peste care modelul va curge liber.

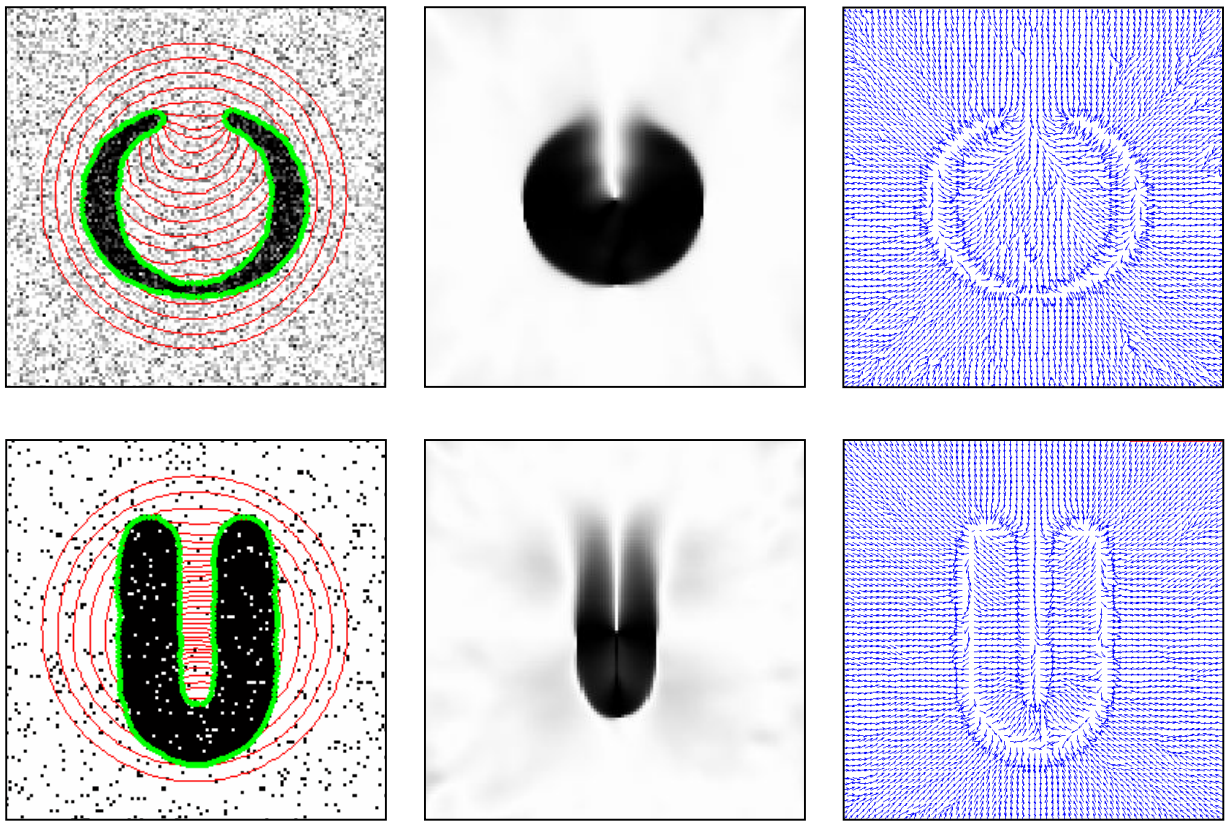


Fig. 29 – Evoluția modelului, factorul anizotropic și câmpul VFC extins.

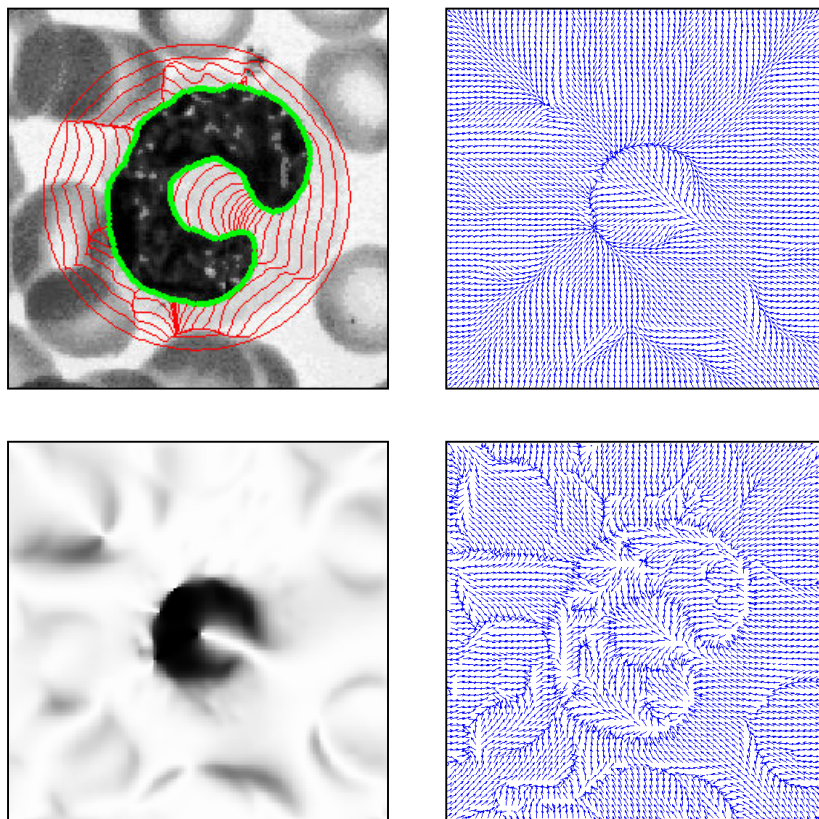


Fig. 30 – Evoluția modelului, harta de vectori de deplasare, factorul anizotropic și câmpul VFC extins.

Retrospectivă și concluzii

Certificatul de naștere al modelelor de contur deformabile îl constituie un articol din anul 1987 intitulat “Șerpi: modele active de contururi” [9], în care acestea se definesc ca fiind curbe care își minimizează energia.

Capitolul 1 al tezei reface traseul conceptual al modelelor de contur deformabile în reprezentare parametrică. Pe scurt, modelele de contur deformabile sunt curbe care se deplasează într-o imagine sub acțiunea forțelor interne ce provin din curba însăși și a celor externe ce sunt calculate din imagine. Amândouă tipurile de forțe sunt definite astfel încât modelul va evolua spre frontiera obiectului prin minimizarea unei funcționale de energie al cărei minimum corespunde frontierei. Forțele interne înzestrează curba cu proprietăți ca tensiunea și rigiditatea, iar ea este condusă spre frontiere de către forțele externe definite ca gradientul negativ al unei funcții de potențial calculată din imagine.

Capitolul 1 evidențiază aceste modele ca fiind o nouă paradigmă în segmentarea imaginilor, detecția muchiilor și urmărirea mișcării și, totodată, relevă trei dificultăți pe care acestea le au și anume: modelele trebuie să fie inițializate în apropierea frontierelor obiectelor (altfel ele pot să fie atrase într-un minimum local al energiei), au dificultăți în a pătrunde în concavitățile acestora dacă sunt inițializate în exteriorul zonei non-convexe și sunt sensibile la zgomot.

Rolul crucial pentru performanța modelelor îl au forțele externe care conduc procesul de deformare și care, în mod esențial, constituie mecanismul care captează percepția utilizatorului în privința trăsăturilor relevante din imagine. Cele trei dificultăți enumerate mai sus sunt produse de acțiunea limitată a forțelor externe de potențial din formularea originală a modelelor deformabile.

Capitolul 2 este o sinteză și o analiză a tipurilor esențiale de forțe ce au fost formulate ulterior pentru a depăși aceste dificultăți. Forțele de presiune tratează modelul ca pe un balon pe care îl pot umfla sau dezumfla. În acest fel, se rezolvă multe din problemele legate de inițializare, zgomot și accesul în concavități. Dificultatea de a corela mărimea forțelor de presiune cu mărimea celorlalți parametri ai modelului a alimentat eforturile în direcția găsirii altor tipuri de forțe.

Curgerea vectorilor gradient (GVF) și versiunea generalizată a acesteia (GGVF) au apărut ca soluții spectaculoase pentru limitările modelului original, iar astăzi sunt privite ca borne de hotar ale întregii istorii a curbilor deformabile. Pe scurt, aceste forțe sunt obținute printr-un proces de difuzie a vectorilor gradientului unei hărți de muchii. Ele permit inițializarea modelului la distanță mare față de muchii, conducerea curbei deformabile în concavitățile moderate și obținerea unor bune rezultate în imaginile afectate de zgomot.

Ulterior au apărut câmpul electric virtual (VEF) și convoluția câmpului vectorial (VFC). Există multe asemănări între modelele VEF, VFC și GVF/GGVF în privința convergenței în concavitățile obiectelor, extinderii domeniului de captare din jurul muchiilor, inițializării flexibile, toleranței la zgomot, integrării conturilor întrerupte, subiective și a punctelor împrăștiate. VFC are însă o calitate foarte

specială, respectiv capacitatea de a putea fi ușor modificat/modelat anizotropic în funcție de o anumită aplicație particulară.

Capitolul 3 oferă o enumerare a aplicațiilor curente ce folosesc modelele de contur deformabile pentru segmentarea sau urmărirea mișcării, în diverse domenii (imagistica medicală, microscopie, biometrie, topografie, imagini satelitare, conducerea asistată de calculator a vehiculelor), ca probă a interesului pentru subiect.

Capitolul 4 tratează segmentarea obiectelor puternic non-convexe care este un domeniu ce s-a dovedit greu sau deloc abordabil prin utilizarea tipurilor de forțe expuse în capitolul 2.

Forțele de tip GVF, formează la intrarea în concavitățile obiectelor puternic non-convexe (de tip potcoavă) o zonă în care forțele sunt orientate în direcții opuse și în dreptul căreia modelul se va opri dacă este inițializat în exteriorul concavității. (Un comportament similar cu cel al GVF în fața frontierelor puternic non-convexe este prezentat și de forțele VEF sau VFC).

Unii matematicieni [5] susțin că formele puternic non-convexe nu pot fi abordate de către modelele GVF/GGVF întrucât nici o tehnică nu va înlătura zona de la intrarea în concavitate în care forțele sunt orientate în direcții opuse. De asemenea, aceștia consideră că situația este inerentă în cazul modelelor GVF/GGVF, deoarece ele se bazează pe un proces liniar izotrop (difuzia căldurii) care determină apariția unei astfel de zone atunci când obiectul este puternic non-convex.

Incapacitatea forțelor GVF de a conduce curba deformabilă către frontiera obiectului în acest gen de situații a făcut ca multe din eforturile ulterioare să se concentreze asupra găsirii altor soluții. În secțiunea 4.1. sunt trecute în revistă soluțiile apărute recent, cu mențiunea că toate acestea sunt obligate să folosească hărți de muchii continue, fie întâmpină dificultăți atunci când sunt aplicate imaginilor afectate de zgomot. În concluzie, pe de o parte aceste soluții alternative utilizează mecanisme diferite de cel al modelului GVF, iar pe de altă parte performanțele lor sunt depășite de cele ale GVF acolo unde acesta este aplicabil cu succes.

În secțiunea 4.2. este prezentată prima contribuție originală importantă a acestei teze: o inovație care păstrează nemodificată structura matematică a modelului GVF și care revelează capacitatea neașteptată a acestuia de a aborda frontierele puternic non-convexe. Această abilitate poate fi privită ca o proprietate ascunsă a procesului de difuzie GVF.

În secțiunea 4.3. este prezentată a doua contribuție originală importantă a acestei teze: o extensie a forței VFC capabilă să abordeze obiectele puternic non-convexe și realizată printr-un mecanism de modelare anizotropică determinată de imagine.

Importanța rezultatelor este atestată de acceptarea lucrărilor [13] și [14] la conferințe internaționale de prestigiu.

Bibliografia tezei cuprinde o sută cincizeci de referințe.

Bibliografie esențială

- 1 Vicent Caselles, Francine Catté, Tomeu Coll, Françoise Dibos, "A geometric model for active contours in image processing", *Numerische Mathematik*, vol. 66, p. 1-31, Springer Berlin / Heidelberg, 1993.
- 2 Jinyong Cheng; Yihui Liu; Ruixiang Jia; Weiyu Guo, "Active contour model based on force field tracking," *Proceedings of the 2007 Int. Conf. on Convergence Information Tech.*, pp. 466-469, 2007.
- 3 Laurent D. Cohen, "On active contour models and balloons", *Computer vision, graphics and image processing: Image understanding*, 53(2), p. 211-218, 1991.
- 4 Rodrigo De Luis-Garcia, Marcos Martin-Fernandez, Juan Ignacio Arribas, Carlos Alberola-Lopez, "A fully automatic algorithm for contour detection of bones in hand radiographs using active contours", *Proceedings of the 2003 Int. Conference on Image Processing, Volume 3*, p. 421-424, vol. 2, 2003.
- 5 Debora Gil, Petia Radeva, "Curvature vector flow to assure convergent deformable models for shape modelling," in *Lecture notes in computer science* vol. 2683 Springer, Berlin, p. 357-372, 2003.
- 6 Zhiqiang Hou, Chongzhao Han, "Force field analysis snake: an improved parametric active contour model", *Pattern recognition letters*, vol. 26, issue 5, p. 513 – 526, 2005.
- 7 Jim Ivins, John Porrill, "Statistical snakes: active region model", *Proceedings of the conference on British machine vision*, vol. 2, p. 377–386, 1994.
- 8 Tina Kapur, W. Eric L. Grimson, William M. Wells III, Ron Kikinis, "Segmentation of Brain Tissue from Magnetic Resonance Images", *Medical Image Analysis* vol. 1, no.2, p. 109-127, 1996.
- 9 Michael Kass, Andrew Witkin, Demetri Terzopoulos, "Snakes: Active contour models", *International Journal of Computer Vision*, 1(4), p. 321–331, 1987.
- 10 Bing Li, Scott T. Acton, "Active Contour External Force Using Vector Field Convolution for Image Segmentation", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 8, p. 2096-2106, August 2007.
- 11 Hyun Keun Park, Myung Jin Chung, "External force of snakes: virtual electric field", *Electronic letters*, vol. 38, no. 24, p. 1500-1502, 21st November 2002.
- 12 Jerry L. Prince, Chenyang Xu, "A new external force model for snakes," 1996 *Image and Multi-dimensional Signal Processing Workshop*, p. 30-31, 1996.
- 13 Tiberiu Rădulescu, Vasile Buzuloiu, "A hidden property of the gradient vector flow diffusion process", 2009 *International Conference on Image Processing (ICIP 2009) – acceptată*, 2009.
- 14 Tiberiu Rădulescu, Vasile Buzuloiu, "Extended vector field convolution snake for highly non-convex shapes segmentation", 9th *International Conference on Information Technology and Applications in Biomedicine (ITAB 2009) – acceptată*, 2009.
- 15 K. W. Sum, Paul Y. S. Cheung, "Boundary vector field for parametric active contours," *Pattern Recognition archive*, vol. 40, Issue 6, p. 1635-1645, 2007.
- 16 Demetri Terzopoulos, "Multilevel computational processes for visual surface reconstruction", *Computer vision, graphics, and image processing*, vol. 24, issue 1, p. 52-96, 1983.
- 17 Demetri Terzopoulos, "Regularization of inverse visual problems involving discontinuities," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8(4), p. 413–424, 1986.
- 18 Demetri Terzopoulos, "On matching deformable models to images," *Topical Meeting on Machine Vision, Technical Digest Series, Vol. 12 (Optical Society of America)*, Incline Village, Nevada, p. 160–163, 1987.
- 19 Demetri Terzopoulos, Andrew Witkin, Michael Kass, "Constraints on deformable models: Recovering 3D shape and nonrigid motion", *Artificial Intelligence*, 36(1), p. 91–123, 1988.
- 20 Tao Wang, Irene Cheng, Anup Basu, "Fluid vector flow and applications in infant brain tumor segmentation," *IEEE Transactions on biomedical engineering*, vol. 56, no. 3, p. 781 – 789, March 2009.
- 21 Chenyang Xu, Jerry L. Prince, "Snakes, Shapes, and Gradient Vector Flow," *IEEE Transactions on Image Processing*, 7(3), p. 359-369, March, 1998.
- 22 Chenyang Xu, Jerry L. Prince, "Generalized Gradient Vector Flow External Forces for Active Contours," *Signal Processing - An International Journal*, 71(2), p. 131-139, December, 1998.