

The 'gas of circles' model and its application to tree crown extraction

Doktori értekezés tézisei

Horváth Péter

Témavezetők

Ian Jermyn Ph.D., Kató Zoltán Ph.D.,
és Josiane Zerubia Ph.D.

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Matematika és Számítástudományok Doktori Iskola

NIZZAI EGYETEM – SOPHIA ANTIPOLIS
Információs és Kommunikációs Tudományok és Technológiák Doktori Iskola

2007

Bevezetés

Ebben a tézisben bemutatjuk a „gas of circles” (GOC) modellt, mely a képen olyan régiók együttesének leírására szolgál, melyek ismeretlen számú, megközelítőleg azonos sugarú kört tartalmaznak, a körök közötti rövid távú kölcsönhatással. A modell gyakorlati jelentőségét egy erdészeti alkalmazáson: légi felvételeken fák koronájának pontos körvonalazásán szemléltetjük. A módszer a „higher-order active contour” (HOAC) [RJZ03, RJZ06] keretrendszeren alapul, mely a kontúrponatok közötti hosszabb távú interakciókkal előzetes geometriai információt ír le, template-alakzat felhasználása nélkül. Ez a tulajdonsága ideálissá teszi egy objektum többszörös előfordulásának megtalálására a képen. Egy ilyen modell előállításához a köröknek stabilnak kell lenniük a határaikon fellépő perturbációkkal szemben: azaz, a HOAC energia lokális minimumainak kell lenniük, különben a körök átalakulnának más alakzatokká. Azonban ez egy nem triviális feltétel. Ezt a HOAC energia körön vett Taylor-sorfejtésével oldjuk meg; majd az elsőrendű tagtól megköveteljük, hogy nulla legyen minden perturbáció esetére, a másodrendű tagtól pedig, hogy pozitív szemidefinit legyen. Ezen feltételek lehetőséget adnak a modell egy paraméterének rögzítésére, a többit pedig korlátozzák. Az energiát gradiens módszerrel minimalizáljuk, ennek megvalósításához a level-set keretrendszert használjuk [OS88]. A HOAC energia felhasználásával kísérleteink igazolják az konzisztenciát a gyakorlat és az elmélet között.

Habár, az általános „gas of circles” modellnek számos alkalmazási lehetősége van, mégis van egy hátránya: a körhöz tartozó lokális minimumok a gradiens módszernek akadályt állíthatnak, így fantom objektumok képződhetnek még a képi információ támogatása nélkül is. A problémát a paraméterek olyan választásával oldjuk meg (az energia Taylor-sorba fejtésével), melyek használatával a körök az energiának nem lokális minimumai, hanem inflexiós pontjai lesznek. Megmutatjuk még, hogy így a modellnek egyetlen mindent átfogó paramétere marad, emellett a modell gyakorlati alkalmazhatósága is javul.

Habár a HOAC „gas of circles” modell hatékonyan használható kör alakú alakzatok modellezésére, alkalmazása során mégis felmerül néhány nehézség. Kontúr reprezentációval bonyolult kifejezni a régiók terét és ebből következően nehéz valószínűségi formulákkal dolgozni. Algoritmikai szemszögből nézve, a jelenlegi modell nem biztosít elég topológiai szabadságot; implementációja bonyolult és számításigényes. Ugyanakkor előállítható a HOAC modell egy alternatív formulája, mely a fizikában használt régiók és interfészek modellezésére szolgáló phase field keretrendszeren alapul. A standard phase field modell ekvivalens a klasszikus aktív kontúr modellel. A HOAC energia paramétereinek függvényében meghatározzuk azon phase field paramétereket, melyek ekvivalens modellt eredményeznek. Ez azt jelenti, hogy meghatározhatóak olyan phase field paraméterek, melyek stabil, adott sugarú köröket eredményeznek. A phase field „gas of circles” modellünket abban az esetben is alkalmazhatjuk, amikor az energiának inflexiós pontja van a kívánt sugárban.

Emellett két adatmodellt is bevezetünk. Az első a rendelkezésünkre álló színes infravörös képek (CIR) az egyetlen, legjellemzőbb csatornáját használja: az infravörös csatornát. Ez a modell a képgradiens és Gauss-eloszláson alapul, kihasználva azt, hogy a fakoronákon és a háttéren a pixelek intenzitásának különböző a szórása és várható értéke. Annak ellenére, hogy a modell sikeresnek bizonyult, még jelentős előzetes régió-információ esetén sem képes pontosan detektálni az összes fa koronájának körvonalát. Ennek megoldására, második adatmodellünk a CIR képek mindhárom csatornáját felhasználja. Megvizsgáljuk az eredményeket, először azt feltételezve, hogy a három csatorna független majd, hogy nem az. Mint azt látni fogjuk, a „szín” információ használatával már maximum likelihood esetén is sokat javul az eredmény. Ez különösképp igaz, ha a csatornák között korreláció van. Következésképpen, az előzetes alakzat-információval kombinálva modellünk jelentős javulást eredményez az egycsatornás modellhez képest.

Modellünket fakoronák körvonalának detektálására használjuk légi felvételeken, habár más, nem erdészeti jellegű alkalmazások is lehetségesek. Néhány más példa: nanotechnológiában különböző részecskék és microarray-ek detektálására elektronmikroszkóppal készült képeken; biológiában kör alakú sejtek és molekulák szegmentálására, vagy pollen részecskék detektálására; orvosi képfeldolgozásban; távérzékelésben, légi és műholdképek feldolgozása során, meteorológiai, harcászati vagy mezőgazdasági alkalmazásokban.

1. tézis: A „gas of circles” modell [HJKZ06a]

A HOAC modell többszörös integrál a kontúr körül. Ezen integrálok a kontúrponatok közötti hosszú távú kölcsönhatásokat írnak le, lehetőséget adva komplikált előzetes geometriai tudás modellbe integrálására. A kontúr hosszát és a területét leíró tagokkal kombinálva, az egyik legegyszerűbb Euklideszi invariáns kvadratikus HOAC model [RJZ03, RJZ06]:

$$E_g(\gamma) = \lambda_C L(\gamma) + \alpha_C A(\gamma) - \frac{\beta_C}{2} \iint dp dp' \dot{\gamma}(p) \cdot \dot{\gamma}(p') \Psi(R(p, p')), \quad (1)$$

ahol γ a p -vel paraméterezett kontúr; L a kontúr hossza; A a kontúr által határolt terület; $R(p, p') = |\mathbf{r}(p, p')|$, ahol $\mathbf{r}(p, p') = \gamma(p) - \gamma(p')$; $\dot{\gamma}$ a kontúr tangens vektora; és Ψ az interakciós függvény, mely a modell geometriai tulajdonságait határozza meg. Stabilitási analízissel meghatározzuk a modell paramétereinek olyan beállítását, mely esetén az alacsony energiaszintek megközelítőleg azonos sugarú köröket eredményeznek.

A szerző hozzájárulása

A szerző bemutatta a higher-order active contour modell stabilitásának analízisét, elkészítve a „gas of circles” modellt, és definiálta a szükséges feltételeket és az ezekből következő paraméter korlátozásokat.

Stabilitási analízis

Teljes modellünk a következő: $E(\gamma, I) = E_i(I, \gamma) + E_g(\gamma)$. A likelihood energiát a 4. tézispontban ismertetjük. Elemezni fogjuk E_g -t az előzetes alakzat-információ energiáját, és megmutatjuk, hogyan használhatjuk körök modellezésére. Úgy állítjuk be a modell paramétereit, hogy azok a konfigurációk, melyek megközelítőleg azonos r_0 sugarú köröket tartalmaznak, stabilak és alacsony energiájúak legyenek. Esetünkben a stabilitás azt jelenti, hogy ha egy r_0 sugarú kör alakja kissé megváltozik, akkor az visszaalakul körré. Úgy választjuk a paramétereiket, hogy egy r_0 sugarú kör az E_g energia-minimuma legyen.

Az r_0 sugrú kör körül másodfokú tagig Taylor-sorba fejtjük az energia perturbációit, majd úgy állítjuk a paramétereiket, hogy az első derivált nulla legyen, mely azt jelenti, hogy a kör az energia szélsőértéke, és hogy a második derivált pozitív definit legyen, így ez a szélsőérték energia-minimuma lesz. A paraméterek további beállításával elérhető, hogy a kör energiája ne legyen túl magas.

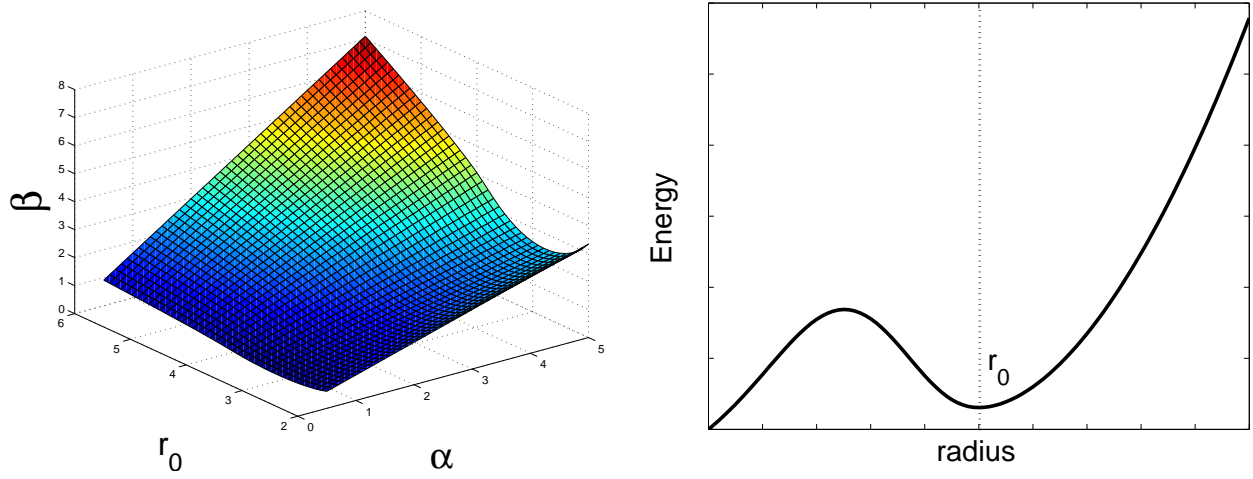
Meghatározzuk $E_g(\gamma) = E_g(\gamma_0 + \delta\gamma)$ a $\delta\gamma$ szerinti másodfokig, ahol γ_0 az r_0 sugarú kört jelöli. Mivel kör körüli kifejtést alkalmazunk, a legegyszerűbb az (r, θ) polárkoordináták használata; paraméterezésként pedig a $\theta(p) = p$ választása. A sugárirányú perturbáció δr kör körüli Fourier sorba fejthető:

$$\delta r(p) = \sum_k a_k e^{ikr_0 p} \quad k = m/r_0, m \in \mathbb{Z},$$

ahol $a_k \ll r_0$. Az $L(\gamma)$ és az $A(\gamma)$ másodfokú tagig a következőképpen fejezhető ki:

$$L(\gamma) = 2\pi r_0 \left\{ 1 + \frac{a_0}{r_0} + \frac{1}{2} \sum_k k^2 |a_k|^2 \right\} \quad (2a)$$

$$A(\gamma) = \pi r_0^2 + 2\pi r_0 a_0 + \pi \sum_k |a_k|^2. \quad (2b)$$



1. ábra. Bal: β_C értékei α_C és r_0 függvényében (lásd (4). egyenlet); ($d = 4$); jobb: E_0 értékei r függvényében, $\alpha_C = 1.0$, $\beta_C = 0.96$, és $r_0 = 5.0$ paraméterek esetén.

A kvadratikus tag kifejtése sokkal bonyolultabb, mivel ki kell fejtenünk $\dot{\gamma}$, R , és Ψ tagokat is. A körön történő eltolás-invariancia azt jelenti, hogy a másodfokú tag diagonális a Fourier bázisban. Az energia a (2). egyenletekkel kombinálva másodfokú tagig:

$$E_g(\gamma_0 + \delta\gamma) = E_0 + a_0 E_1 + \frac{1}{2} \sum_k |a_k|^2 E_2(k),$$

ahol

$$\begin{aligned} E_0 &= 2\pi\lambda_C r_0 + \pi\alpha_C r_0^2 - \pi\beta_C \int_0^{2\pi} dp F_{00} \\ E_1 &= 2\pi\lambda_C + 2\pi\alpha_C r_0 - 2\pi\beta_C \int_0^{2\pi} dp F_{10} \\ E_2 &= 2\pi\lambda_C r_0 k^2 + 2\pi\alpha_C - 2\pi\beta_C \left[\left(2 \int_0^{2\pi} dp F_{20} + \int_0^{2\pi} dp F_{21} e^{ikr_0 p} \right) \right. \\ &\quad \left. + k \left(2ir_0 \int_0^{2\pi} dp F_{23} e^{ikr_0 p} \right) + k^2 \left(r_0^2 \int_0^{2\pi} dp F_{24} e^{ikr_0 p} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

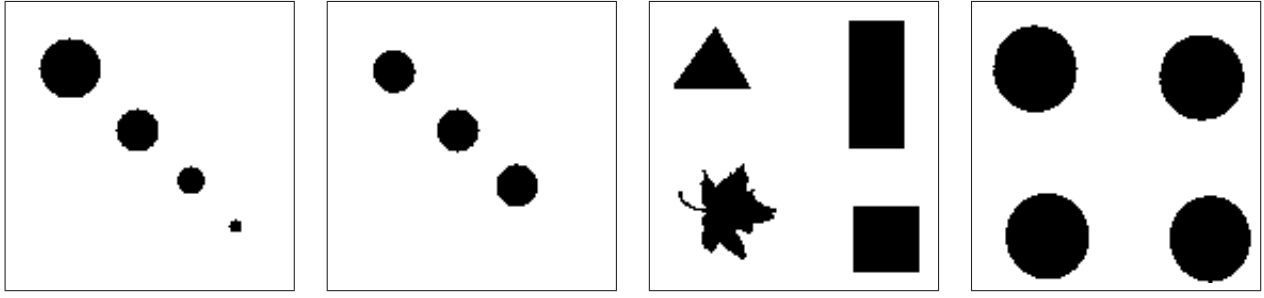
Az F -ek a p , r_0 és Ψ függvényei.

Paraméter korlátok

Szélsőérték eléréséhez a lineáris tagnak nullának kell lennie. Ebből adódik, hogy:

$$\beta_C(\lambda_C, \alpha_C, r_0) = \frac{\lambda_C + \alpha_C r_0}{\int_0^{2\pi} dp F_{10}}, \quad (4)$$

mely adott λ_C , α_C , és r_0 értékek esetén rögzíti β_C -t. Az általánosság elvesztése nélkül $\lambda_C = 1.0$ érték választható. Így a stabilitás eléréséhez adott r_0 esetén csak két szabad paramétert kell beállítanunk, hogy E_2 pozitív legyen minden k -ra. Az 1. ábra bal oldalán láthatók β_C értékei r_0 és α_C függvényében. Adott r_0 ezen felszín egy szeletét határozza meg – lehetséges stabil (α_C, β_C) párokat – ám ezek közül csak azok valóban stabilak, melyekre $E_2 \geq 0$ minden k esetén. A 1. ábra bal szélén E_0 értékeit láthatjuk egy ilyen paraméter párosra. Vegyük észre, hogy r_0 -ban az energiának minimuma van, ezért stabil a sugárirányú perturbációkkal szemben ($k = 0$). Szintén stabil azon perturbációkkal szemben, melyekre $k \neq 0$. A 2. ábrán egy kísérletet láthatunk mely során csak az előzetes alakzatinformációt leíró energiáját használtuk fel, az evolúciót különböző kezdeti állapotokból indítva bemutatja, hogy kívánt sugarú köröket kapunk.



2. ábra. Stabil körök képződése a második és negyedik ábrákon $r_0 = 10$ és 20 esetén; két különböző inicializálással az első és harmadik ábrákon.

2. tézis: Az inflexiós pontot tartalmazó „gas of circles” modell [HJKZ06b]

Az 1. ábra jobb szélén láthattuk a kör energiáját a különböző sugarak függvényében olyan paraméter beállítások esetén, melyek megfelelnek a „gas of circles” modellnek, azaz helyi energiaminimum található az r_0 -ban. Képi információ hiányában, az energia globális minimuma az üres régió. De a gradiens módszer nem tud túljutni a lokális minimumon; azaz az evolúció során kialakult r_0 sugarú körök már nem tűnnek el, még akkor sem ha az adatkifejezés nem támogatja létezésüket.

A szerző hozzájárulása

A szerző bemutatta a HOAC paraméterek olyan új beállítását, melyek inflexiós pontot eredményeznek az energiafüggvényen lokális minimum helyett; így azon körök, melyeket az adatkifejezés nem támogat eltűnnek, de már kicsiny kör létezését alátámasztó képi információ képes energia-minimumot képezni az adott sugárban. Ezenfelül, az új kritérium csökkentette a paraméterek számát.

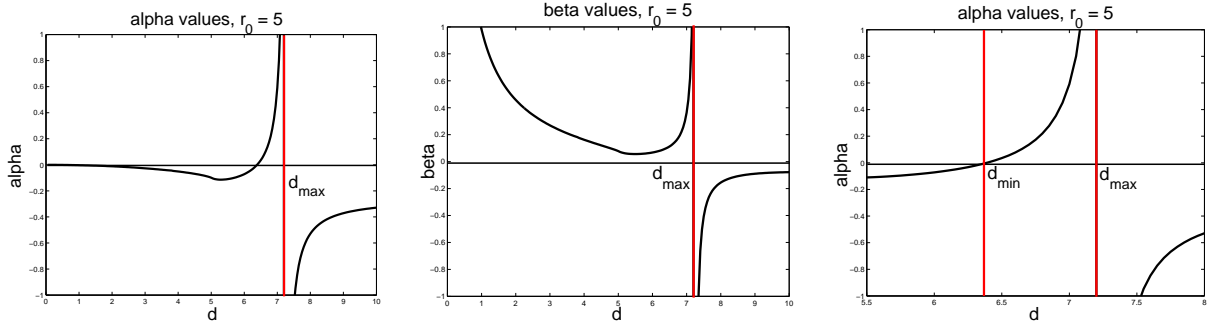
Inflexiós pont

Célunk, hogy a paraméterek egy olyan beállítását megmegtaláljuk, mely a görbe minimumát lecseréli egy széles, megközelítőleg lapos területre, ahogy az a 4. ábrán is látható. Egy ilyen energia-konstrukció jelentése az, hogy képi információ hiányában a kör összemegy majd eltűnik; ugyanakkor már kis mennyiségű képi információ sikeresen minimumot képez a lapos területen, és stabil kört eredményez. A lehetséges módszer ennek elérésére egy olyan energiafüggvény készítése, melynek inflexiós pontja van, habár az ennek megfelelő paraméter értékek meghatározása nem triviális.

Az r_0 sugarú körnek még mindig stabilnak kell lennie a perturbációkkal szemben minden $k > 0$ esetre; az is szükséges, hogy ezen kör inflexiós pont legyen a $k = 0$ perturbációk, azaz a sugár változásainak függvényében. Látni fogjuk, hogy egy konstans szorzó erejéig és d értékeinek egy kicsiny intervallumán ezen feltételek elegendőek az inflexiós pont eléréséhez. Egészen pontosan, még mindig szükséges, hogy $E_1(r_0) = 0$ és $E_2(k, r_0) > 0$ a $k > 0$ értékekre, de mostmár az $E_2(0, r_0) = 0$ is biztosítani kell. Az első feltétel a (4). egyenletet eredményezte, míg a második mely a (3). egyenletből következik szintén az α_C és β_C közötti kapcsolatot fejez ki:

$$\alpha_C(r_0) = \beta_C(r_0)\tilde{G}(r_0), \quad (5)$$

ahol $\tilde{G}(r_0) = 2G_{20}(r_0) + G_{21}(0, r_0)$. Az (4). és (5). egyenletből a következőképp fejezhető ki α_C és β_C :



3. ábra. Balról jobbra haladva ($r_0 = 5.0$ minden esetben): α_C értékei d függvényében; β_C értékei d függvényében; α_C nagyított nézete a kritikus tartomány környezetében.

$$\alpha_C(r_0) = \frac{\lambda_C \tilde{G}(r_0)}{G_{10}(r_0) - r_0 \tilde{G}(r_0)} \quad \text{és} \quad \beta_C(r_0) = \frac{\lambda_C}{G_{10}(r_0) - r_0 \tilde{G}(r_0)}. \quad (6)$$

Ezen egyenletek rögzítik α_C és β_C értékeit r_0 és d függvényében. Mivel r_0 -t az alkalmazás során rögzítjük, a fennmaradó szabad paramétereink d , és a teljes geometriai modell erejét meghatározó paraméter. Megjegyezzük ugyanakkor, hogy α_C és β_C paramétereknek pozitívnak kell lenniük. A kérdés, hogyan határozhatók meg adott r_0 -ra d értékei úgy, hogy $\alpha_C(r_0) > 0$ és $\beta_C(r_0) > 0$ legyen.

A d paraméter meghatározása

A megérteni kívánt viselkedés illusztrálására a 3. ábrán láthatjuk α_C és β_C értékeit d függvényében fix r_0 esetén ($r_0 = 5$). Két kritikus pont d_{\min} és d_{\max} látható. α_C és β_C értékei csak a $d_{\min} < d < d_{\max}$ intervallumon pozitívak

A (6). egyenletből könnyedén látható, hogy d_{\max} a nevező zérushelyénél található, míg d_{\min} a számlálónál, ezért d_{\min} és d_{\max} meghatározásához elegendő ezen zérushelyeket megtalálnunk. Először megmutatjuk G_{00} skálázhatóságát. G_{00} -t a következőképpen definiáltuk:

$$G_{00}(r) = \int_{-\pi}^{\pi} dp \cos(p) r^2 \Psi\left(2r \left| \sin \frac{p}{2} \right| \right). \quad (7)$$

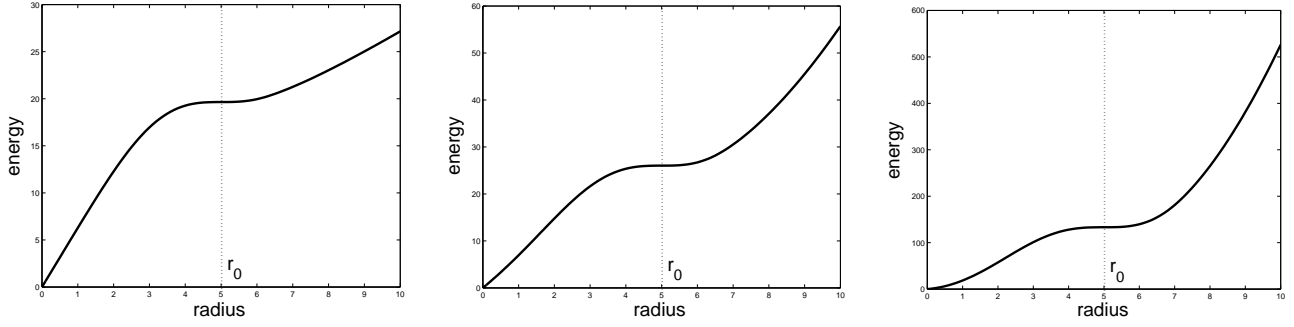
Mivel $\Psi(z)$ kizárólag z/d függvénye, d^2 kiemelésével G_{00} a következő alakban írható: $G_{00}(r) = d^2 \hat{G}_{00}(r/d)$. Emlékeztetőként $G_{10} = \frac{1}{2} \partial_r G_{00}$ és $\tilde{G} = \partial_r G_{10}$, azaz

$$\tilde{G}(r_0) = \hat{G}(r_0/d) \quad \text{és} \quad G_{10}(r_0) - r_0 \tilde{G}(r_0) = d \left(\hat{G}_{10}(r_0/d) - \frac{r_0}{d} \hat{G}(r_0/d) \right),$$

ahol $\hat{G}_{10}(z) = \frac{1}{2} \partial_z \hat{G}_{00}(z)$ és $\hat{G}(z) = \partial_z \hat{G}_{10}(z)$. Ezért a (6). egyenlet számlálója és nevezője egy pozitív multiplikatív konstans erejéig felírható r_0/d függvényeként. Így $f(r, d) = \hat{f}(r/d)$ és $f(r, d_0) = 0$ -ból következik, hogy $f(ar, ad_0) = 0$ minden $a \in \mathbb{R}$ esetén; ezért ha d_{\min} és d_{\max} -t egyetlen r_0 értékre meghatározzuk, akkor ebből az összes r_0 -ra ismerjük értékeiket.

Azért, hogy ne legyen szükség iteratív numerikus eljárás használatára d_{\min} és d_{\max} meghatározásakor, G_{00} -t polinommal közelítjük:

$$G_{00}(r) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n r^n.$$



4. ábra. E_0 értékei r függvényében $r_0 = 5.0$ esetén. α_C és β_C értékeit az (6). egyenlet felhasználásával határoztuk meg. Bal oldalon $d = 6.4$; középen $d = 6.8$; jobb oldalon $d = 7.2$. Ezen r_0 értékre $d_{\min} = 6.3880$, $d_{\max} = 7.2495$.

Könnyen megmutatható, hogy:

$$b_m = \begin{cases} 0 & m < 2, \\ \frac{1}{(m-2)!} \int_{-\pi}^{\pi} dp \cos(p) Y^{(m-2)}(0) & m \geq 2, \end{cases} \quad (8)$$

ahol $Y(r) = \Psi(2r|\sin(p/2)|)$. Az Y értékei nullában:

$$\frac{Y^{(m)}(0)}{(2|\sin(p/2)|)^m} = \Psi^{(m)}(0) = \begin{cases} 1 & m = 0, \\ 0 & m = 1 \text{ vagy } m \text{ páros}, \\ (-1)^{\frac{m-1}{2}} \frac{1}{2d} \left(\frac{\pi}{d}\right)^{m-1} & m \geq 3 \text{ és } m \text{ páratlan}. \end{cases}$$

A (8). egyenletbe helyettesítve b_m -re kapjuk, hogy:

$$b_m = \begin{cases} 0 & m < 5 \text{ vagy } m \text{ páros}, \\ (-1)^{\frac{m-1}{2}} \frac{4(2\pi)^{m-3}}{m!(m-4)!} \frac{1}{d^{m-2}} & m \geq 5 \text{ és } m \text{ páratlan}. \end{cases}$$

Így \tilde{G} és $G_{10} - r\tilde{G}$ értékei:

$$\tilde{G}(r) = 2 \sum_{\substack{m \geq 3 \\ m \text{ odd}}} \frac{(-1)^{\frac{m+1}{2}} (2\pi)^{m-1} (m+1)}{m!(m-2)!} \left(\frac{r}{d}\right)^m$$

$$G_{10}(r) - r\tilde{G}(r) = 2d \sum_{\substack{m \geq 4 \\ m \text{ even}}} \frac{(-1)^{\frac{m-2}{2}} (2\pi)^{m-2}}{[(m-3)!]^2} \left(\frac{r}{d}\right)^m.$$

Ezen polinomok gyökeit meghatároztuk az $m \leq 49$ fokú tagok felhasználásával. A legkisebb pozitív gyökök adták d_{\min} és d_{\max} értékeit. Eredményül azt kaptuk, hogy $d_{\min} \simeq 1.2776r_0$ és $d_{\max} \simeq 1.4499r_0$. A 4. ábra grafikonjain láthatjuk E_0 értékeit r függvényében, $r_0 = 5$ esetén, d értékeit $d_{\min} < d < d_{\max}$ tartományból választottuk

3. tézis: A phase field „gas of circles” modell [HJ07a, HJ07b]

A phase field ϕ az Ω képen értelmezett valós függvény. Egy adott z küszöbszámra, a phase field meghatároz egy régiót $\zeta_z(\phi) = \{x \in \Omega : \phi(x) > z\}$. Ezért a phase field egy level-set reprezentációnak tekinthető. A különbség egy általános távolságfüggvény és a phase field között az, hogy a függvényre nincsenek megszorítások: a lehetséges ϕ -k halmaza Φ egy lineáris tér. A legegyszerűbb phase field energia [RJZ05]:

$$E_0(\phi) = \int_{\Omega} dx \left\{ \frac{D}{2} \partial\phi \cdot \partial\phi + \lambda \left(\frac{1}{4} \phi^4 - \frac{1}{2} \phi^2 \right) + \alpha \left(\phi - \frac{1}{3} \phi^3 \right) \right\} .$$

$D = 0$ választással $\phi_R \triangleq \arg \min_{\phi: \zeta_z(\phi)=R} E_0(\phi)$, azaz egy rögzített régiót minimalizáló phase field +1 értéket venne fel R belsejében és -1 -et kívül. $D \neq 0$ választása kisimítja ϕ_R -et úgy, hogy egy véges szélességű interfészt képez ∂R környezetében. A phase field modell megközelítőleg ekvivalens a klasszikus aktív kontúr modellel [RJZ05], abban az értelemben, hogy:

$$E_0(\phi_R) \approx \lambda_C L(\partial R) + \alpha_C A(R) , \quad (10)$$

A kontúr paraméterek a következőképp számolhatóak [RJZ05]:

$$\alpha_C = 4\alpha/3 , \quad \lambda_C^2 = 16D\lambda K/15 , \quad K = 1 + 5(\alpha/\lambda)^2 , \quad w^2 = 15D/\lambda K .$$

A kvadratikus HOAC energia közelítésére, az energiát a következő taggal egészítette ki Rochery és tsai [RJZ05]:

$$E_{NL}(\phi) = -\frac{\beta}{2} \int_{\Omega^2} dx dx' \partial\phi(x) \cdot \partial\phi(x') G(x - x') , \quad (11)$$

ahol $G(x - x') = \Psi(|x - x'|/d)$. $\beta_C = 4\beta$ választással, $E_g = E_0 + E_{NL}$ ekvivalens a HOAC modellel ($E_{C,G}$), és így felhasználható helyette, ezáltal lehetővé téve a régió geometriáját leíró, nem triviális előzetes tudás beépítését a phase field modell nyújtotta összes kedvező tulajdonság kiaknázásával.

A szerző hozzájárulása

A szerző megmutatta, hogyan lehetséges a már korábban meghatározott „gas of circles” paramétereket áttranszformálni a phase field modellre úgy, hogy az kívánt sugarú, stabil köröket képezzen, valamint meghatározta a paraméter átalakítás feltételeit. Továbbá bemutatta az inflexiós pontot tartalmazó „gas of circles” modell paramétertranszformációjának lépéseit és korlátait.

A „gas of circles” higher-order phase field modell

A phase field és a kontúr paraméterek közötti összefüggés felhasználásával elkészítjük a phase field „gas of circles” modellt, mely ekvivalens az 1. tézis pontban ismertetett HOAC GOC modellel (az egységeket úgy választjuk, hogy $d = 1$, $\tilde{\tau}$ pedig λ_C -vel történő normalizálást jelent). Az alábbi lépéseket javasoljuk:

1. Válasszuk ki w értékét. Nem lehet túl kicsi, különben szubpixel diszkretizáció szükséges, de túl nagy sem, mert akkor a phase field modell nem lesz jó közelítése a HOAC modelleknek.
2. Válasszuk $\tilde{\alpha}_C \leq \sqrt{5}/(2w)$.
3. Határozzuk meg az r_0 és $\tilde{\alpha}_C$ -hez tartozó $\tilde{\beta}_C$ paramétert, az 1. tézisben leírtak szerint.
4. Állítsuk $\tilde{\lambda} = \frac{15}{8w} [1 + \sqrt{1 - 4\tilde{\alpha}_C^2 w^2 / 5}]$, $\tilde{\alpha} = 3\tilde{\alpha}_C/4$, $\tilde{\beta} = \tilde{\beta}_C/4$, és $\tilde{D} = w/4$.
5. Válasszunk λ_C értéket, majd szorozzuk meg vele \tilde{D} , $\tilde{\lambda}$, $\tilde{\alpha}$, és $\tilde{\beta}$ paramétereket, így megkapjuk D , λ , α , and β értékeit.

A phase field inflexiós pontot tartalmazó „gas of circles” modell

Kombináljuk a phase field „gas of circles” modellt azokkal a feltételekkel, melyekkel az energia az előírt sugarú kör esetén minimum helyett, inflexiós pontot tartalmaz. Ez egy nem triviális elvárás. Rochery és tsai a phase field és a kontúr paraméterek közti kapcsolatot a ϕ_R közelítésével határozták meg [RJZ05]. A „gas of circles” modell esetén nem különösebben fontos a pontos közelítés, mert a kisebb hibák a modell viselkedését csak kevésbé befolyásolják. Ellenben fontos, hogy ezen approximáció helyesen őrizze meg az inflexiós pont tulajdonságot.

Az előző alfejezetben, $\tilde{\alpha}_C$ -t a $\tilde{\alpha}_C \leq \sqrt{5}/(2w)$ feltételnek megfelelően választottuk. A 2. tézispontban bemutattuk, hogy adott r_0 és d esetén hogyan rögzítsük $\tilde{\alpha}_C$ és $\tilde{\beta}_C$ értékeit. Mindkét feltétel teljesítése érdekében $w \leq \sqrt{5}/2\tilde{\alpha}_C$ választása szükséges. Az inflexiós pontot tartalmazó phase field modell paramétereinek meghatározására a következő lépéseket kell követnünk:

1. Válasszuk d paraméter értékét a 2. tézispontban leírt inflexiós pont kritériumnak megfelelően. Ez rögzíti $\tilde{\alpha}_C$ és $\tilde{\beta}_C$ értékeit.
2. A fenti kritérium segítségével válasszunk w értéket.
3. Határozzuk meg $\tilde{\lambda}$, $\tilde{\alpha}$, $\tilde{\beta}$, és \tilde{D} paramétereket a már ismert módon.
4. Szorozzuk meg ezen paramétereket λ_C -vel.

4. tézis: A HOAC és phase field modellek adatkifejezései [HJKZ06a, HJ07a, Hor07]

A szerző hozzájárulása

A szerző bevezetett két különböző adatkifejezést. Először a HOAC modellt egészítette ki, egy a gradiensen és Gauss-eloszláson alapuló taggal, mely egycsatornás képekre használható. Ezt követően bemutatta az intenzitáson alapuló tag kiterjesztését többcsatornás képekre, több-dimeziós Gauss-eloszlást használva.

A legegyszerűbb likelihood energia, egycsatornás képeket használ. A képet Gauss-eloszlásokkal modellezzük R -en és \bar{R} a háttéren. Hozzáadunk még egy tagot, mely a magas gradiensértékeket fejezi ki ∂R -on:

$$E_{C,I}(I, R) = \lambda_i \int dp \mathbf{n}(p) \cdot \partial I(\gamma(p)) + \alpha_i \left[\int_R d^2x \frac{(I(x) - \mu_{\text{in}})^2}{2\sigma_{\text{in}}^2} + \int_{\bar{R}} d^2x \frac{(I(x) - \mu_{\text{out}})^2}{2\sigma_{\text{out}}^2} \right],$$

ahol \mathbf{n} a normalizálatlan kifelé mutató normálvektor. A μ_{in} , σ_{in} , μ_{out} , és σ_{out} paramétereket maximum likelihood segítségével példákából nyerjük, majd rögzítjük.

Az ezzel ekvivalens phase field adatkifejezés a következőképpen definiálható:

$$E_i(I, R) = \int_{\Omega} dx \left\{ \lambda_i \partial I \cdot \partial \phi + \alpha_i \left[\frac{(I - \mu_{\text{in}})^2}{2\sigma_{\text{in}}^2} \phi_+ + \frac{(I - \mu_{\text{out}})^2}{2\sigma_{\text{out}}^2} \phi_- \right] \right\},$$

ahol $\phi_{\pm} = (1 \pm \phi)/2$.

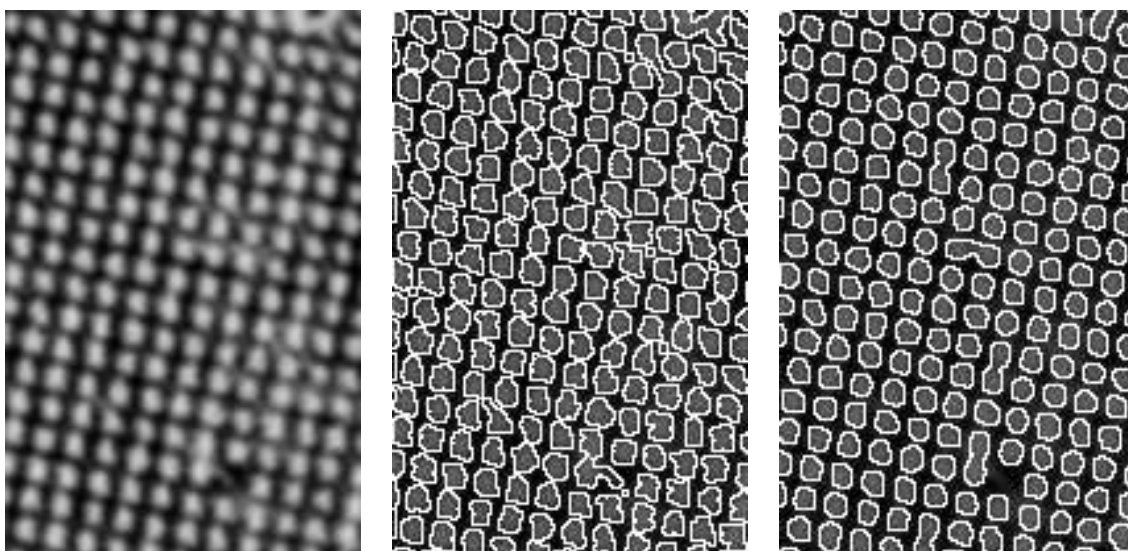
Bizonyos esetekben nem csak egycsatornás, hanem színes vagy multispektrális képek is rendelkezésünkre állnak. A többi csatorna felhasználásával kifejlesztettük a multispektrális adatkefezésünket, mely teljes kovariancia-mátrixú Gauss-eloszlásokon alapul. E_i paramétereit maximum likelihood felhasználásával példákából nyertük ki, majd rögzítettettük. A középértékeket az előtéren és a háttéren M_{in} és M_{out} jelöli, míg a kovariancia mátrixokat Σ_{in} és Σ_{out} . Az energiát a következőképpen definiáljuk:

$$E_i(I, R) = - \int_R dp \ln \left[\det^{-1/2}(\Sigma_{in}/2\pi) e^{-\frac{1}{2}(I(p)-M_{in})^T \Sigma_{in}^{-1} (I(p)-M_{in})} \right] - \int_{\bar{R}} dp \ln \left[\det^{-1/2}(\Sigma_{out}/2\pi) e^{-\frac{1}{2}(I(p)-M_{out})^T \Sigma_{out}^{-1} (I(p)-M_{out})} \right].$$

Az energiát gradiens módszerrel minimalizáljuk.

Kísérleti eredmények

Ebben a fejezetben bemutatjuk azokat a kísérleti eredményeket, melyeket a Hungarian Central Agricultural Office, Forestry Administration (CAO, FA) és a French Forest Inventory (IFN) által rendelkezésünkre bocsájtott légifelvételeken értünk el. A kísérletek során felhasznált pontos paraméter beállításokat a tézis kísérleti eredményeit bemutató fejezetben találjuk.

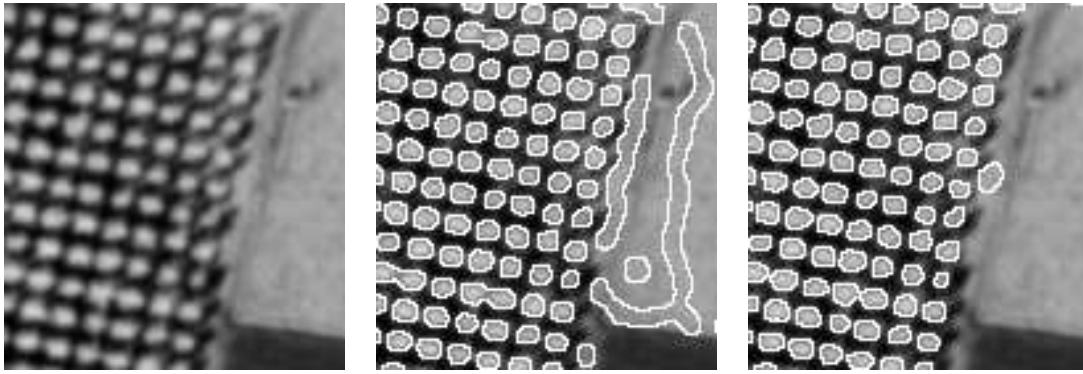


5. ábra. Balról jobbra: nyárfákat tartalmazó légifelvétel ©IFN; a legjobb eredmény melyet a klasszikus aktív kontúrral értünk el; a „gas of circles” modell eredménye.

A 5. ábrán az eredeti felvétel látható a bal oldalon, az aktív kontúr modell segítségével elért legjobb eredmény a középső képen, valamint a HOAC „gas of circles” modell eredménye a jobb oldalon. A fák közel vannak egymáshoz, s bár a képen elkülönülnek, a klasszikus aktív kontúrral többségük mégis érinti egymást. A HOAC modell sokkal tisztábban körvonalazza a koronákat, mégis előfordul néhány összeolvadás.

Egy nehezen elemezhető kép látható a 6. ábrán, két különböző intenzitású mezővel a bal oldalán. A phase field „gas of circles” modellel elért eredményt a középső kép ábrázolja. Tisztán látható a nem inflexió pontot tartalmazó modell hátránya: fantom objektumok képződése a homogén területeken. A jobb oldali képen láthatjuk azt az eredményt, melyet az inflexió pontot tartalmazó modellel értünk el. Az eredmény jó, egyetlen hibával. Mindkét eredmény kevesebb, mint 1 pernyi futásidőt igényelt.

Végül a 7. ábra bal oldalán egy, az előzőektől eltérő CIR képet láthatunk: elszigetelt fákat egy mezőn. A multispektrális modellel elért eredményünket a középső kép ábrázolja: a szegmentálás eredményes, csak



6. ábra. Bal: szabályosan ültetett nyárfákat tartalmazó kép különböző mezőkkel a jobb szélén © IFN ;
középen: a „gas of circles” phase field modellel elért eredmény; jobb: az inflexiós pontot tartalmazó GOC
phase field modell eredménye.



7. ábra. Bal: színes infravörös kép; középen: eredmény a multispektrális GOC modellel; jobb: a 2.
tézispontban bemutatott geometriai modell és a kép egyedüli infravörös csatornájának felhasználásával elért
eredmény. © IFN

a fák lettek detektálva. A jobb képen a 2. tézispontban bemutatott modellünk, valamint a kép kizárólag in-
fravörös csatornájának kombinálásával elért eredmény látható: kevésbé jó szegmentálás; egy nagy, helyte-
lenül detektált körrel és kisebb hibákkal a fakoronákon.

Az eredmények tézisszerű összefoglalása

A szerző eredményeit négy tézispontba rendezve foglaljuk össze. A 1. táblázat bemutatja, hogy az egyes
tézispontokat a szerző mely publikációiban találhatjuk.

1. A szerző ismertette a higher-order active contour modell stabilitásának analízisét, elkészítve a „gas of
circles” modellt, és definiálta a szükséges feltételeket és az ezekből következő paraméter korlátozá-
sokat.
2. A szerző bemutatta a HOAC paraméterek olyan új beállítását, melyek inflexiós pontot eredményeznek
az energiafüggvényen lokális minimum helyett, így azon körök, melyeket az adatkifejezés nem tá-
mogot eltűnnek, de már kicsiny kör létezését alátámasztó képi információ képes energia minimumot
képezni az adott sugárban. Ezenfelül az új kritérium csökkentette a paraméterek számát.

	[HJKZ06a]	[HJKZ06b]	[HJ07a]	[HJ07b]	[Hor07]
1	*				
2		*			
3			*	*	
4	*		*		*

1. táblázat. Kapcsolat a tézispontok és a szerző publikációi között.

3. A szerző megmutatta, hogyan lehetséges a már korábban meghatározott „gas of circles” paramétereket átranzformálni a phase field modellre úgy, hogy az kívánt sugarú, stabil köröket képezzen, valamint meghatározta a paraméter átalakítás feltételeit. Továbbá bemutatta az inflexió pontot tartalmazó „gas of circles” modell paraméter-transzformációjának lépéseit és korlátait.
4. A szerző bevezetett két különböző adatkifejezést. Először a HOAC modellt egészítette ki, egy a gradiensen és Gauss-eloszláson alapuló taggal, mely egycsatornás képekre használható. Ezt követően bemutatta az intenzitáson alapuló tag kiterjesztését többsatornás képekre, többdimeziós Gauss-eloszlást használva.

A szerző publikációi

- [HJ07a] P. Horváth and I. H. Jermyn. A „gas of circles” phase field model and its application to tree crown extraction. In *Proc. European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Poznan, Poland, September 2007.
- [HJ07b] P. Horváth and I. H. Jermyn. A new phase field model of a „gas of circles” for tree crown extraction from aerial images. In *Proc. International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP)*, Lecture Notes in Computer Science, Vienna, Austria, August 2007.
- [Hor07] P. Horváth. A multispectral data model for higher-order active contours and its application to tree crown extraction. In *Proc. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, Lecture Notes in Computer Science, Delft, Netherlands, August 2007.
- [HJKZ06b] P. Horváth, I. H. Jermyn, Z. Kato, and J. Zerubia. An improved „gas of circles” higher-order active contour model and its application to tree crown extraction. In *Proc. Indian Conference on Vision, Graphics and Image Processing (ICVGIP)*, Lecture Notes in Computer Science, Madurai, India, December 2006.
- [HJKZ06a] P. Horváth, I. H. Jermyn, Z. Kato, and J. Zerubia. A higher-order active contour model for tree detection. In *Proc. International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Hong Kong, China, August 2006.

Irodalomjegyzék

- [OS88] S. Osher and J. A. Sethian. Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *Journal of Computational Physics*, 79(1):12–49, 1988.
- [RJZ03] M. Rochery, I.H. Jermyn, and J. Zerubia. Higher-order active contours and their application to the detection of line networks in satellite imagery. In *Proc. IEEE Workshop Variational, Geometric and Level Set Methods in Computer Vision*, at ICCV, Nice, France, October 2003.

- [RJZ05] M. Rochery, I.H. Jermyn, and J. Zerubia. Phase field models and higher-order active contours. In *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Beijing, China, October 2005.
- [RJZ06] M. Rochery, I.H. Jermyn, and J. Zerubia. Higher-order active contours. *International Journal of Computer Vision*, 69(1):27–42, August 2006.

Coauthor's declaration

June 27, 2007

I hereby certify that I am familiar with the following publications of the applicant Mr Péter Horváth:

1. Peter Horvath, *Ian Jermyn*, Zoltan Kato, and Josiane Zerubia. **A Higher-Order Active Contour Model for Tree Detection**. In Proceedings of the *International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*. Hong Kong, China, August 2006. IAPR, IEEE.
2. Peter Horvath, *Ian Jermyn*, Zoltan Kato, and Josiane Zerubia. **An improved 'gas of circles' higher-order active contour model and its application to tree crown extraction**. In Proceedings of the *Indian Conference on Vision, Graphics and Image Processing (ICVGIP'06)*. Madurai, India, December 2006. LNCS.
3. Peter Horvath, *Ian Jermyn*. **A new phase field model of a 'gas of circles' for tree crown extraction from aerial images**. In Proceedings of the *12th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP'07)*, Vienna, Austria, August 2007. LNCS.
4. Peter Horvath, *Ian Jermyn*. **A 'gas of circles' phase field model and its application to tree crown extraction**. In Proceedings of the *European Signal Processing Conference (EUSIPCO'07)*, Poznan, Poland, September 2007. EURASIP

Regarding to our joint results referred to in these articles, the following ones were obtained as the result of joint contribution by the applicant and myself:

1. The introduction and state-of the art. Conclusion.
2. The Introduction and the Conclusion. Fixing the parameters giving an inflection point. Determination of the interaction function parameter providing non-negative parameters.

3. Using the recent inflection point 'gas of circles' model parameters with the phase field framework.
4. The application of higher-order phase field model instead of the higher-order active contour model, for the description of multiple circles with similar radii.

The applicant's contribution was prominent in obtaining the following results:

1. Stability analysis and conditions, and consequent parameter constraints. Addition of the gradient term to data energy. The synthetic justification of the model and the experiments and analysis of results on aerial images.
2. The idea to use an inflection point instead of a minimum in the circle energy, thereby solving the problem of phantom circles. The experiments and analysis of results.
3. Converting the inflection point 'gas of circles' parameters, to the phase field framework, determining the steps of the transformation and the constraints. The synthetic and real experiments and analysis of results.
4. Determining the steps and the constraints of the parameter conversion from the higher-order active contours to the phase field framework. Synthetic and real experiments and analysis of results.

My own contribution was prominent in obtaining the following results:

1. Using the higher-order active contour model to describe circular regions. The introduction of the data term using the pixel intensities.
2. Using Taylor polynomials to approximate the interaction function's parameter.
3. -
4. Embedding recent higher-order active contour data model into the phase field framework.

Sophia Antipolis, 27 June 2007.



Dr. Ian H. Jermyn

Coauthor's declaration

July 31, 2007

I hereby certify that I am familiar with the following publications of the applicant Mr Péter Horváth:

1. Peter Horvath, Ian Jermyn, **Zoltan Kato**, and Josiane Zerubia. **A Higher-Order Active Contour Model for Tree Detection**. In Proceedings of the *International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*. Hong Kong, China, August 2006. IAPR, IEEE.
2. Peter Horvath, Ian Jermyn, **Zoltan Kato**, and Josiane Zerubia. **An improved 'gas of circles' higher-order active contour model and its application to tree crown extraction**. In Proceedings of the *Indian Conference on Vision, Graphics and Image Processing (ICVGIP'06)*. Madurai, India, December 2006. LNCS.

Regarding to our joint results referred to in these articles, the following ones were obtained as the result of joint contribution by the applicant and myself:

1. publication: The introduction and overview on the state-of the art. Conclusion.
2. publication The introductory and the conclusion part. Fixing the parameters so that using the derivative constraints giving inflection point. Determination of the interaction function parameter providing non-negative parameters.

The applicant's contribution was prominent in obtaining the following results:

1. publication: The expression of the quadratic term, stability conditions. The synthetic justification of the model and the experimental results on aerial images.

2. publication: The idea using an inflection point instead of energy minimum at the circle energy, solving the problem of phantom circles. The experimental results part.

My own contribution was prominent in obtaining the following results:

1. publication: Tests on real data.
2. publication: Validation of the experimental results.

Szeged, 31 July, 2007.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'ZK' followed by a long horizontal stroke.

Zoltán Kató

Coauthor's declaration

June 27, 2007

I hereby certify that I am familiar with the following publications of the applicant Mr Péter Horváth:

1. Peter Horvath, Ian Jermyn, Zoltan Kato, and *Josiane Zerubia*. **A Higher-Order Active Contour Model for Tree Detection**. In Proceedings of the *International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)*. Hong Kong, China, August 2006. IAPR, IEEE.
2. Peter Horvath, Ian Jermyn, Zoltan Kato, and *Josiane Zerubia*. **An improved 'gas of circles' higher-order active contour model and its application to tree crown extraction**. In Proceedings of the *Indian Conference on Vision, Graphics and Image Processing (ICVGIP'06)*. Madurai, India, December 2006. LNCS.

Regarding to our joint results referred to in these articles, the following ones were obtained as the result of joint contribution by the applicant and myself:

1. The introduction and state-of the art. Conclusion.
2. The Introduction and the Conclusion. Fixing the parameters giving an inflection point. Determination of the interaction function parameter providing non-negative parameters.

The applicant's contribution was prominent in obtaining the following results:

1. Stability analysis and conditions, and consequent parameter constraints. Addition of the gradient term to data energy. The synthetic justification of the model and the experiments and analysis of results on aerial images.
2. The idea to use an inflection point instead of a minimum in the circle energy, thereby solving the problem of phantom circles. The experiments and analysis of results.

My own contribution was prominent in obtaining the following results:

1. - Tests on real data
2. - Validation with the French Forest Database

Sophia Antipolis, 27 June 2007.

Dr. Josiane Zerubia



I.N.R.I.A.
UNITE DE RECHERCHE
SOPHIA-ANTIPOLIS
2004 Route des Lucioles B.P. 6
06902 SOPHIA ANTIPOLIS CEDEX
TEL : 04 92 38 77 77