A e S t C t g 46 (2016) 851–867

Contents lists available at ScienceDirect

Applied Soft Computing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/asoc

St ct e atc g e o t-sa e c -st ct e

e s t est ato o e t Ga ss a t e o e e e-
se t g t e eat e o ts. T e e e t g a - ase CPD o [7]
e o e g a e t a t esto g o o g a o ato g
t e esp e e e tato . F t e o e eat e- e e a t
fi te t e o e as o o se [8]. To g t ese a g t s
a e o st o t e ss g esp e ces, e o t e s oo t
t a so ato tato e g e se s t e o t e a g -
t fi g o a eat e esp e ces, t e o t est ato o
esp e e a s oo t t a so ato s st fic t o t e
o t e ss es t at a e o t ss g esp e ces a o a
a ge o ato s.

B e t s g t e ete age ata o e e e se
esp e ces at e - e e e cs o , o st te s t - ase
o g eg st ato a o ac es a e eg a e as g o a o e
ase et o s t at a e o te o ate as g o a e e g -
zato o e s t t e e e g e g o se o a
eg a zato te a a s a t te [10–14]. T e eat e
e g to s a t te a eg a zato te a a se t e
e - o t a e et ee t e eg st ato acc ac a t e
s oo t ess t e o ato fie [12]. I t e ese e o t-
e s, t e acc ate a a s e o a st t e atc g o es
o t e st s g o e- te s t e t a so ato o e. T e
eat e s at a eg a zato a e t e a se o -s oo t a
a s e s o to t ese o t e eg o s o to e o e-
s oo t a acc ate a g a t acts et ee t e o e
ages. T s o t e o e a e a t o e e e t g
e e tato a a zato a g t o est ate t e ss g
o a t a ata [10,11], s g a o a a g e g t et ee
eg a zato a ages a t [13–18], c eat g a t fica
esp e ces [19–24] a st- to as g [25–27], o
e e g SIFT fi o a ge s a e e t [2]. M sto t ese
a o ac es a e a ge e e e to o t e eg o seg e tato
to t g g s e ato o t t e ss g esp -
e ces a o a age o ato s.

At ese t, t e e s o o t t at et o s a a g t s o
te ge t t g a ac e ea g a e e e a e
o tac e t s c a e g g o t e o e st t e atc g.
I t ese esea c fie s, o t e s ea t e e t e e o se ato s
s sta t a e e t o a o t e o es t e ea ata. I
st t e atc g, t e ss g esp e ces a o a a ge
o ato s to e t e e t e e o a ge et c a te -
s t e e ces et ee t e t o ages

st ct e o e t gat e o e at e t sa es t e sa e st ct e t e e e e eg ess , e e t e eg ess o s oo t at s ca eo ca a t t t e e g o ca sa e c st ct es to t ect g t e at a oss t e e ges a e s o ca st ct es.

T s a e sa e te e es o a e a e e ce o [38]. T ee te s sa ea g e te o e eta e eto es c to s, o e a at sa o e to o g sc ss s o et ca cases 2D o ca st ct e atc g, c a e ge e a a o t e te s a atte e g to . T e es t s a e s ga ze as o s. T e o o se a g t s e a o ate Se to 2 o e t ca e e e ta es ts Se to 3. T e o e a e s c e Se to 4.

2. Methods

2.1. C a e fi e c e a chi g ba ed b c a chi g

T e st ct e atc g o e s ate as a est a to o at o a o g age I_M t es ect a e e e ce age I_R s g t a at o τ a a ete ze a o s a ce e t e t(x), e ex st e o s o e t e e e e ce age. T e e o g age s efi e $I_M \circ \tau(x) = I_M(x + t(x))$. A s a ce e t e fie es c es at a age e s a ze t e s a t eas e et ee t e e o g age a e e e ce age. o ta t e s a ce e t fie o a g t s t o a t ee-ste a se- -fi e te at e o c atc g sc e e o o se [30]. T s o c atc g a e o s e o ea t age at o g age eg st at o . F g. 1 s a s t e t ee-ste a se- -fi e te at e st ct e atc g a e o , e e e e t e es a e t e o eo to s t t e sa e o ce e. F st, t e o g age I_M s e t a ta s a ce e t fie o ta e s at a te o at o o t e t t at o fie o ta e o t e eo s ee. T e e o g age a t e e e e ce age t e c e t e e a e eg ste e o c - atc g o ta t e sc ete s a ce e t fie . Se , te s g t e JSS a a t e e e eg ess (see t e g ee o c ag a s F g. 1) t t e e e e ect g t e e ge-st ct e es o e ce a e e e ce st ct e so e ta- to , t e st ct e atc g sc e e s e st ct e se c e t at o fie o t e sc ete s a ce e t fie . At ast, t e es te g a at o t e te at o at e t e e s o se o ta at o a c e t at o sa g t e ta at o fie . T e fi st e e, s ta g a - at o s a fi e t a at o as t e t o ages a e t ca a ea fi e- eg ste e e s g st ct e atc g.

I t e fi st ste at eac e e, t e o g age s e a ta s a ce e t fie o e o s ee a sa e t e o s to o t e sa e e e e ce age get e o g age. As e o c ag a at F g. 1, e e e e o g age, a o c (.e., a te e g o oo F g. 1) a t e e o o g age I_M s ta e a atc e aga st a set o o te ta es e t o c s e e ce age. T e o c s a ce e t (t e e a o F g. 1) t at ac e es t e ests - a t (0.65) et ee t e o c s o g a e e ce ages, s e as t e sc ete s a ce e t o t e o g a e. t t e at eo ea st c st ct e at o o s g t es at a t a at o e a e o s , t e e t e Ja a o t e o ca at o fie st e o st e. T s to s e- se e o o e e s a ce e t s a o e eac e at eac e eo t - eo to o c atc g. e e e e eo t e t - eo to a , t e fi a t a at o o ta e e o s g t e t a at o o t e eo s ee t t o e o t e c e t e e, o e ese e t e Ja a o st e ess to [30].

I t s st , e e o o t- se MI [39] as t e o ca s - a t eas e o c atc g. As a g -sta a eg st at o c te o t o ages e eg ste e , M t e age te s t a es e s o g e a s s a a t e t o ages a e ge et ca a g e. T e MI et ee t e e e e ce a o g ages s efi e a te as:

$$MI = H(R) + H(M) - H(R, M)$$

$$= \sum_{i_R, i_M} p(i_R, i_M) \log\left(\frac{p(i_R, i_M)}{p(i_R)\,p(i_M)}\right) \quad (1)$$

e e i_R a i_M a e age te s t es o e e e ce a o g age. $H(I) = -\sum_i p(i)\log p(i)$ a $H(R,M) = -\sum_{i_R,i_M} p(i_R, i_M)\log p(i_R, i_M)$ a e t e e to o t e te s - t es o age I a t e e to o t e o t te s t es o t o ages, $p(i)$ s t e te s t o a t es t $p(i_R) = \sum_{i_R} p(i_R, i_M)$ a $p(i_M) = \sum_{i_M} p(i_R, i_M)$, $p(i_R, i_M)$ s t e o t o a t est to (PDF) est ate t eo t te s t g a $h(i_R, i_M)$. e t e g o a M o e ages ca e ca c ate as a s o o ca t to S_{MI}, efi e eac a age e a i_R, i_M, t e a o e g o a MI ca e e tte as:

$$MI = \frac{1}{N}\sum_{i_R, i_M} S_{MI}(i_R, i_M)$$
$$S_{MI}(i_R, i_M) = \log\left(\frac{p(i_R, i_M)}{p(i_R)\,p(i_M)}\right) \quad (2)$$

e e t e o t- se S_{MI} s ca c ate o t eo t PDF e- so g t e o e ages c a ea ta o N e a g age e s. a g e s a ce e t, t, s o t PDF e t e g o a o t te s t g a o t e e e e ce age t t e s a ce o e o atc g age. T s s o ta t o t e t- eo to o c atc g, e eo e e s a ce e t ca ast ca c a g e t e PDF est at o . est ate t eo t a s a ce e t o e e eo o g age at t- eo to o c atc g, t e o g age s s a ce o e e s- a ce e t o eo e a e t t e fi e e e e ce age, a t e o ca e a at o o t e MI ca e te st s g t e t to s e a s o t o e a e e o . T e e- o e, at e e e t e c e t s a ce e t o es o g t e ggest o ca MI a e s e as t e o t a s a ce e t o t e c e t at o fie est at o .

A to g o c atc g as a a a tages o ta g t e at o o a age, e e t g t s a g t s st s fice t a o t e eg a to t a at o ss c as tea - g, g a s t g t e c a e g g st ct e atc g t o t es. T e e, t e e st cto st a t s s- e sa e e te g ate t e eg st at o o ce e. t s e , o ca JSS a a t e e e eg ess (as t e g ee o c a- g a s F g. 1) s a e t t s sc ete s a ce e t fie s t e se stage e st ct t e e se at o fie : F st, e te st ct e te o ate eac e o s to t e e e e ce a t e e o g ages. Base o t e st ct e te o e e e ce age, t eo ca st ct e a a t e a o to c e e s es g e s ea a g t e e to o t e o ca e ge st c- t e e e e ce age, e e e se t s a o to c e e, s o e ta to at o a a t e stee t eo ca e e e- e eg ess e se at o e st cto . T s sc e e e a es e ect ee ge-a a e at o e st cto t at e- e ts t e ea st c at o fie es ea e a o sso ect o a es. Se , t e ce te -s o ss a t et ee e g o g o ca st ct e te o s s e o e est ate t e sa e c a cat g t e o ca sa e c e ge st ct e st - to o age. Base o t e atc g eg ee o o ca sa e c a , t e o t sa e c a s st cte e as ze t e JSSs

Fig. 1. F c a o a se -fi est c e atc g a e o . (F te eta o t e e e ces o o te t, t e ea e s e e e o t e e e s o t ea t c e.)

s c ete s a ce e t fie s t e e e eg ess o o t e e o a . Deta s o t e o o se a o a c a e es c e Sec o s 2.2–2.4. A te t e a o e- e t o e o cess g o ea c e e t s o a se- o -fi e a e o , a s oo t a e se e o a o fie s te at e a c e e e as t e g o a e o a o at t e as t a fi est e e .

2.2. Ke e eg e i ba ed ca def a i ec c i

I s e t e s cess a ca o s o e a ge e - g a s e - e o o a g g [30,31], e t ze e e eg ess o e e st c t e s oo t a e se e o a o fie s o t e s c ete s a ce e t fie s o ta e t o g o c atc g. S o se e a e eg a st te s a ce e t fie s $\{y_i, x_i\}_{i=1}^{P}$ g e t e o

$$y_i = T(x_i) + \varepsilon_i, \qquad x_i \in \Omega, \quad i = 1, \ldots, P \tag{3}$$

e e y_i s a s c ete s a ce e t e o (es o se a a e) at o s o (e a a o a a e) x_i, $T(\cdot)$ es c es t e es e e se e o a o fie s t e o g o s (e e) Ω t e e e t a e t ca st te ze o ea o se $\varepsilon_i = \varepsilon(x_i)$. I stat st cs, t e c o $T(\cdot)$ s t eate as a eg es- s o o y o x, $T(x) = E\{y|x\}$. I t s a , t e e e st c o o o g e o a o fie s s o t e fie o t e eg ess o te c es.

S o se t e o o te est x o e e e st c te s ea x_i, t e t e eg ess o o e se e o a o fie $T(x_i)$ ca e a o - ate a o ca Ta o se es e a s o

$$T(x_i) \approx T(x) + \{\nabla T(x)\}^T(x_i - x) + \frac{1}{2}(x_i - x)^T\{\text{Hess a } [T(x)]\}^T \times (x_i - x) + \cdots \approx \beta_0 + \beta_1^T(x_i - x) + \beta_2^T \text{ ec } \{(x_i - x)(x_i - x)^T\} + \cdots \tag{4}$$

e e ec $(\cdot)$ s a a - e o za o o e a o o a s et c at a $\{\beta_0, \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_N\}$ a e $N+1$ o a a ete s o e est - ate . As t e 2D case, $x = [x_1, x_2]^T$, e ca eas est ate t e o a a ete s as

$$\beta_0 = T(x)$$

$$\beta_1 = \left[\frac{\partial T(x)}{\partial x_1}, \frac{\partial T(x)}{\partial x_2}\right]^T$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2 T(x)}{\partial x_1 \partial x_2}, \frac{\partial^2 T(x)}{\partial x_2^2}\right]^T \tag{5}$$

$$\ldots$$

S ce e a e o t e s c ete s a ce e t e o s $\{y_i\}_{i=1}^{P}$, e ca o te $\{\beta_n\}_{n=0}^{N}$ fi g t e o t o o o t e o o g e g te east s a es o e :

$$\min_{\{\beta_0, \beta_1, \beta_2, \ldots\}} \sum_{i=1}^{P} [y_i - \beta_0 - \beta_1^T(x_i - x) - \cdots]^2 K_H(x_i - x) \tag{6}$$

e e $K_H(\cdot)$ s a e e c o (see t e eta t e e t sec o), c o to s oo t es t e a o a o t a o e a zes sta ce a a o x.

I a to , e ass e y = [y1, y2, ..., yP]^T, b = $[\beta_0, \beta_1^T, \ldots, \beta_N^T]^T$, a K = ag[$K_H$(x1 − x), K_H(x2 − x), ..., K_H(x − x)], t e e a e te t e t zato o e a at

$$\hat{b} = \arg_{b} (y - Xb)^T K (y - Xb) \tag{7}$$

t

$$X = \begin{pmatrix} 1 & (x_1 - x) & \text{ec}^T\{(x_1 - x)(x_1 - x)^T\} & \cdots \\ 1 & (x_2 - x) & \text{ec}^T\{(x_2 - x)(x_2 - x)^T\} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & (x_p - x) & \text{ec}^T\{(x_p - x)(x_p - x)^T\} & \cdots \end{pmatrix}$$

a t e east-s a es est ato o to a e e esse as

$$\hat{b} = (X^T K X)^{-1} X^T K y \tag{8}$$

Be a se t e zero e Ta o se es e a so o as t e *Nada a. –Wa. est* at s s fice t e st t t e s a e- e t e s, t e est ato o t e ato fie at x as t e

$$\hat{T}(x) = \hat{\beta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{P} K_H(x_i - x) y_i}{\sum_{i=1}^{P} K_H(x_i - x)} \tag{9}$$

S e ages a e t e s, t s ea a e s e e- ta t ea c e. T e e, e a a e g t (e ta t) to c_i E . (9)

$$\begin{aligned} \hat{T}(x) = \hat{\beta}_0 &= \frac{\sum_{i=1}^{P} K_H(x_i - x) \cdot (y_i \cdot c_i)}{\sum_{i=1}^{P} K_H(x_i - x) \cdot c_i} \\ &= \frac{K \otimes (y \cdot c)}{K \otimes c} \end{aligned} \tag{10}$$

T e ast o E . (10) a a e e esse t e o o - a ze o to [30], e e ⊗ e o tes o to o e ato . F g. 2 st ates t es o t s a e e t e s e st te e e e a t o ese to e o s g o a e- e eg esso . Be a se o c at c g es ts e e t ta e t at c es, c a e e a e ate t e t es t e t o ese to e o . As a es t, t e fl ts et ee e g - o g s a e e t e s (see t e se e a e c c es s o F g. 2(a)) e e st t e s c ete s a e e t fie s t e t o e o . To se s a e e t fl ts a eas to e t e o o g c a g o st t es, s c as tea g a s t g. t ate , a t e s a e e t e fl ts a e e o e o s o o t e t e o a e e eg esso F g. 2( ), e e t e s- a e e t e s s a g o s te e o s s a ea t t e s a e e t a g t es s ta e s e g s o o t e . Ne t, at c o a st t es t e ese o t e s, e es g st t a a a t e e e e to a o st e g g s c e e t e o g o t e o o st t e a c a c a o st ess o t e o a at o e st to .

2.3. L ca . c. e ada .i e e- e f- c.i-

As a c a o e to o a e e eg esso , t e s a e o t e e e to (o g o) ete es t e s at a st to o sa es c a e gat e e t e a t o t e o a e st te s g a . I c e, o to c Ga ss a e e s a e o st se as e e to s o a a et c eg esso . e e e, t a to a o to c Ga ss a e e s a e s fice t e o e sa e o t e sa e o a t a g o es ec fi o - e tato s s g a e st to . Bes es, Ga ss a e e s fi e

s a es a o e tato s a e t e etect o e a e ge st c- t es. T ese a o s eas a se so a o sso ect o a es. e e t ese est to s, P a et a . o o se a a o to c e e to a a t ts s a e t e e st o sa g [40]. A te a s, Ta e a et a . [41] t ze g a e t a a e at es o st t stee g e e s, c a e ee o e o ssess t e a t a t et ee ges a age a ee t e e o st o se a e t ato so t e ata.

I e se ato e st to , t e es a e o a e e- to s ass e e e te e a o g o a st t e o e - tato t e e e e e age o t at t a gat e o e sa es o s c ete s a e e t e o s t at e eso t e sa e sa e c st t e t e e e e age.

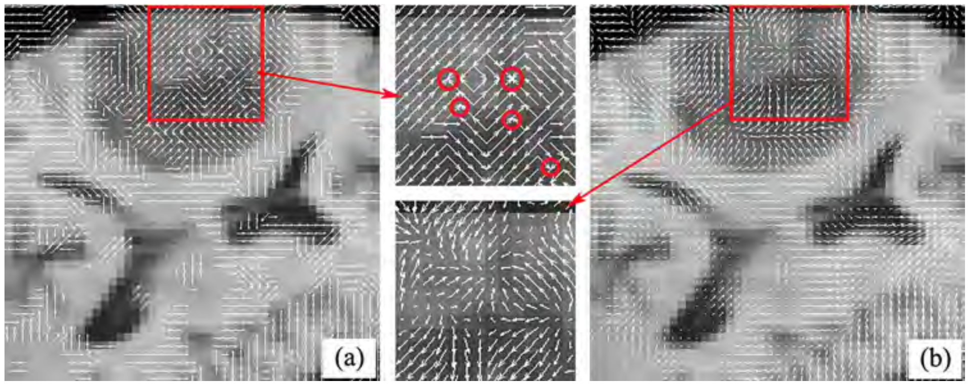

Fig. 2. A ca o e e eg ess ato e st o . (a) T e fl cts et ee e g o g s ace e t e s (se e a e c ces) e e st t e sc ete s ace e t fie t e t o eg . ( ) T e s ace e t e fl cts a e e o e o s oo t e t e ca e e eg ess a g t t e s ace e t ag t ess ta e s e g s oo t e . (te eta t e e e ces e o t s e ge , t e ea e s e e e t e e es o t e a t ce.)

o { , }, t s a o ca st ct e-a a t e Ga ss a e e 2D case s es g e as

$$a(\,,x_0)=\frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_v}\,e\,\left[-\left(\frac{d_u^2}{2\sigma_u}+\frac{d_v^2}{2\sigma_v}\right)\right] \quad (13)$$

$$d_u=\langle d,u\rangle,\quad d_v=\langle d,\,v\rangle,\quad d=x-x_0$$

e e d st e e o x$_0$ x, {d_u, d_v} a e t e o e o t e e o { , }, a t e e a s ca es t e Ga ss a e e {σ_u, σ_v} a e ete e t e a o A as o s:

$$\sigma_u=\frac{\alpha}{\alpha+A}\sigma_c,\quad \sigma_v=\frac{\alpha+A}{\alpha}\sigma_c \quad (14)$$

e e $A=(\lambda_u-\lambda_v)/(\lambda_u+\lambda_v)$. T e t o e a s ca es t e Ga ss a e e ca ea ste t e a a ete $\alpha>0$ a t e o ca s ca e σ_c. S ecifica , α ete es t e e ce t ct o t e e e e o σ_c a ects t e e o sc ete e st at t te t e e st o o t o s a o e s. t e sa e o s ct , t e o ca s ca e s set a t e e g o oo o s ze ea c e e a g o e e e ce. T e e, e set α = 0.5 a σ_c = 1.5 e ca se e t ze a 3 × 3 e e g o oo o o e e e ts.

T o e e o s t o st ct age st ct es a e s- a e at t e o ages Fig. 3, e e t e o sses cate t o e e t s t ca age st ct es (e o ss o e a e o ss o o ge e s eg). I Fig. 3, t e t o a s o to g a e s cate t e a a e t e e eso g Ga ss a e es (e o ss at Fig. 3(c) a e o ss at Fig. 3( )). T e e gt o t e e s ete e t e s ca e t e e o t e e .

Fig. 4 st at e e a s e e e o ca st ct e- a a t e e e e o c e e o st ct e-a a t e e e eg ess . T e eg s o te e a o s a es a s ca e st c- t es c a e o ca a ge ato s. T e e o t e s ace e t e s (s ace e e 5 e s) t ese s a st c- t es a e e ta fl cte t to s o t e a ge ato s o t e e g o g st ct es. T ese ato fl cts t at a e to ce t o o ste s ace e t e s ca eas ca se tea g. g s t g o t e o ca s a s ca e st ct es. e a e, t ee es Fig. 4(c) s a s to o g t e fl ct o t e ato e o s s a e Fig. 4(e). a at e , o o ca st ct e-a a t e e e e ess ess t e t to s t e s ace e t e s c a e o t e s ste t t t e st c- t o e tato , t e ato fl cts a e t e e e o e Fig. 4( ) t o s to e st g t e e es at Fig. 4( ).

Fig. 4( ) e o st ates t o e e o es ato (10 e s e te s ac g) t e o ca st ct e-a a t e e e eg es- , c ca o ce t e s oo t a a t t o o ca es ato t e o ca a o to cst ct es. O o s , t s o ca st ct e-a a t e e e eg ess o ta s s oo t es o - a es c a e o s ste t t t e o ca st ct es o a es. e e , o to c e e es e e eg ess eas o ce eg a e o ca es es c a e o t a a t e t e o ca st ct es, o t at t s e fic t e t o a es o o ca st ct es o t e o -s oo t es ato Fig. 4(g).

2.4. R b eigh i g echa i i g JSM

I e e eg ess , t e e g t o c(x), et ee 0 a 1, s ecifies t e e a t ce ta t) at x t e o ca est- ato a o g o a a a s es c es t e s at a e e e ce t e o ca a g s eca e te t. t o ca ata- e e e t e g ts, e e t o a ze a e e ect e age fi te s a e e o e age a o o cess g fie [28,29]. S ce t e eg t sa e c st ct e ato as ea fl e ce e o ca a a t e age o cess g ase o e- e eg ess , S a ez et a . [30] o o se a e g t g sc e e t e e e e eg ess o eg st ato t a ato s s g t e s ca a eas e o a o ca st ct e e e e ce age. e e , o g age eg st ato , t e sa e t st ct a eg s e- e e ce age a to ce o - eso g sa e t st ct a eg s at sa e o cato s o g age. T e e , t e e t o o o se S a ez et a . s o st e ass g o g g e g ts t e sa e c st ct es t at a e ss g eso e ces.

a o t e a o e- e to e s-ass g e t a ze t o t e e ect o t e ato e st o , e o o se a o st e g t g ec a s s ta e o s s e g t e at c g eg ee o o ca sa e c st ct es t e o e a g a ts o t e t o ages. e e o t e ce to JSM o o st e g t g ec a s a a o e atte o t e JSSs t e t o ages. T e JSSs a t e c g ato s s o ee at ca t eate

Fig. 3. Ga ss a e e s es g e ... e e t a ge ... ca st ct es. (a) T ... a e e ... s t ... s (e ... ss a ... e). ( ) T e s ... es a ... e tat ... s ... Ga ss a Ke e s ... es ... g ... s t ... s. (c) Ga ss a e e ... t e e g ... t e ... ss. ( ) Ga ss a e e ... t e e g ... t e ... ss. (F... te etat ... t e e e ... es ... t s e ge , t e ea e s e e ... t e e es ... t e a t ce.)

Fig. 4. ... a ... et ee s g ... t ... c e e s a s g ... ca st ct e-a a t e e e es e e e g ess ... ase ... at ... e ... st ct ... (a) a ( ) T e e e e ce a ... g a ges. (c) a ( ) l ... c e e s e e e g ess ... t ... e e e s ... t ... s (e a ...) e g ste e ... g a ge, e ... ca st ct e-a a t e e e es ca e ... et ese s ... t ... s. (e) a ( ) l ... c e e s ... ce t e ... at ... fl cts t e s ace e t e ... fie s, e ... ca st ct e-a a t e e e es e ... e t ese ... fl cts. (g) a ( ) l ... t ... c e e s eas ... e g a ... e ... ca es es, e ... ca st ct e-a a t e e e es ac e et es ... t a a t t ... ca es ... at ... t e ... ca a ... t ... cst ct es. (F... te etat ... t e e e ... es ... t s e ge , t e ea e s e e ... t e e es ... t e a t ce.)

[illegible] x_0 [illegible] its [illegible] Ω, [illegible] $S(x_0)$ at x_0 [illegible]

$$S(x_0) = \text{avg} \sum_{x \in \Omega} \| \text{LST}(x) - \text{LST}(x_0) \|_D \qquad (15)$$

[illegible] $\|\cdot\|_D$ defines a distance [illegible] LSTs, [illegible] avg [illegible] Ω [illegible] x_0. [illegible] (FA) [illegible] [44], [illegible]

$$\|T_1 - T_2\|_D = \sqrt{\frac{8\pi}{15}\left(\|T_1 - T_2\|_C^2 - \frac{1}{3}\text{Tr}^2(T_1 - T_2)\right)} \qquad (16)$$

[illegible] $\|T_1 - T_2\|_C = \sqrt{\text{Tr}(T_1 - T_2)^2}$ [illegible] $\{T_1, T_2\}$, Tr [illegible]

[illegible]

LSTs [illegible] JSM [illegible] x_R [illegible] x_M [illegible] JSM [illegible]

$$JS(x_R, x_M) = \ \ \{S_R(x_R), S_M(x_M)\} \frac{A \cdot B}{B + \|\text{LST}(x_R) - \text{LST}(x_M)\|_D} \qquad (17)$$

[illegible] $\{S_R(\cdot), S_M(\cdot)\}$ [illegible] A [illegible] B [illegible] JSM [illegible] 0 [illegible] 1 [illegible] $c(x)$. [illegible] $A = 10$ [illegible] $B = \frac{1}{2}$ [illegible] $(\|\text{LST}(x_R) - \text{LST}(x_M)\|_D)$, [illegible] B [illegible] LSTs [illegible] LST(x_R) [illegible] LST(x_M) [illegible] (17).

Fig. 5 [illegible] JSM [illegible] JSSs. [illegible] JSM [illegible]

Fig. 5. JSM E[illegible] JSMs [illegible]

Fig. 6. T e e e e a t e o g ages a t e g a e t a g t e, a gest e ge a e o fi es GST a LST, a t e JSM a g t e. (a) a ( ) T e e e e a o g ages. (c)–(e) G a e t a g t e o fi es, a gest e ge a e o fi es GST a a gest e ge a e o fi es LST t e e e (a). ( ) a ( ) G a e t a g t e o fi es, a gest e ge a e o fi es GST a a gest e ge a e o fi es LST t e e e ( ). ( ) a ( ) Sa e c a e o fi es t e e es (a) a ( ). ( ) JSM a e o fi es t e e es (a) a ( ). (F te etato t e e e ces t s e ge , t e ea e s e e e t e e e es o t e a t ce.)

e g e a s g ate o e t e o o ge s e g s o o t e e g s. T e sc ete s a ce e t e s t ese e JSS eg s a e e ecte t t te o e t e e e eg esso t a t e e eg s a g JSM a es, t s e g t g sc e e st e e a e JSS a a t e e e e eg esso o o g age eg st ato .

T e JSM o st a es o s t e es o g g -g a e t e ge e s. H e e , t o es o t s g g t t e o age g a e ts t e t o ages. F g. 6 ese ts t e e e ces et ee t e age g a e t a g t e, t e a gest e ge a e GSTs a LSTs, t e sa e c a e a t e JSM a e o fi es o t e sa e e e at t e t o ages (F g. 6(a) a ( )). F eas a , t e a ge o ates F g. 6(c)–( ) a e o [0, 1]. As s F g. 6, t e age g a e t eat es F g. 6(c) a F g. 6( ) t e t o ages a e e se st e o se a o o t a g ee t ea c o t e at ea c o e a g o ato . T e o se se s t t s g a a e ce s g t e GSTs (F g. 6( ) a (g)) a t e LSTs (F g. 6(e) a ( )). T e sa e c a es t e t o ages F g. 6( ) a ( ) a e o st o se e t e t g t e eg a t ast LSTs t o g E . (15). M e e , t e st ct a age ato a a ge eg s a e e s e s e e a g E . (15). As a es t, t e JSM a es (F g. 6( )) te t o g t e sa e c a es ca acc ate ese e t e JSSs a ge ca t e a ge t s a e a a t t a t e age g a e ts. T e e, t e e ect e ess JSM s s g fi e F g. 6.

Beca se t e t es t ce ss g es o e ces, o ca a ge ato s a e ect o c atc g, t e e se ato fie s ca o t es te o ate o t e sc ete s a ce e t e s o c atc g. T e JSS a a t e e e eg esso s se e st ct t e e se ato fie s o t e sc ete s a ce e t e s, .e., s oo t t e t e e ects o t e ato e st cto . D e t e e ecte a- to s t e t e eg e g s ste t t ts e g o g ato s, t e JSM a es t e e g o g eg s a e se ass g e e t e g ts t e e e t s a ce e ts t e e g o g st ct es o to se e g o g ato s t g JSM a es cat g t e s ste c st ct e e ta- to s a e g e g e g ts e e eg esso ase ato e st cto .

F g. 7 st ates a o e e to t e ato fie e st cto te to c g t e JSM- ase o ca JSS a a t e e e eg esso . T e eg o te e a o s F g. 7(c) a ( ) s t e eg t ss g es o e ces a o ca a ge ato s. to t JSM- ase o st e g t g ec - a s , t e e ge s a ce e t e s (5 e s s a c g) o fl ct g ecto s (see F g. 7(e)) t e o t e eg s ea t e st to e ect t e e e eg (see F g. 7(c)). D e t e JSM- ase o st e g t g ec a s to c g e g te s oo t g e ecto t e a g t es a ecto s s a ce e t e s (see F g. 7( )), o g age s e e st to s e o e (see F g. 7( )) t t e t e st ct e ato s e g s ta e s atc e to se t e e e ce age (see F g. 7( )). O a e t t e ato es es (10 e s e te s a c g) F g. 7(g), t e ato es es at F g. 7( ) s a t e o e a s oo t ess o e e t t e st ct a ato s at t e t e st ct es e t e JSM- ase o st e g t g ec a s .

3. Experimental results

To a ate t e o o se a g t [3] o e c a e g g ages t ss g es o e ces a o ca a ge a- to s, e a e a a o g t e o o se a g t a o t e state -t e-a t te st - ase o g eg st ato et - o s s g e t ca 2D age sets, e e t e o g ages t a a et o t e st ct es so e atc e t e e e e ce ages.

e co se ANTs[4] t ge es c s et c o a zato (S) e o c t a ato a MI (AGS1) [45], ANTs

3 tt :// .esc e ce.c / e / / esea c . t
4 tt :// . cs. e .e /ANTs

Fig. 7. Matc g e a ce o e e t t o g JSM- ase o st e g t g e c a s . (a) a ( ) T e e e e ce a o g a ge. (c) a ( ) T e e fl ct g e a o s t e o t e e g (e a o s) spread t e st t

Fig. 8. Chinese character image registration. Our method, AGS2 and the [illegible]NI method show clear advantage over the other methods. (a) and (b) The reference and moving images, (c) Ours, (d) AGS1, (e) AGS2, (f) AMI, (g) DDD, (h) BMI, (i) AMM, (j) EPPM, (k) LDOF, (l) [illegible]NI. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

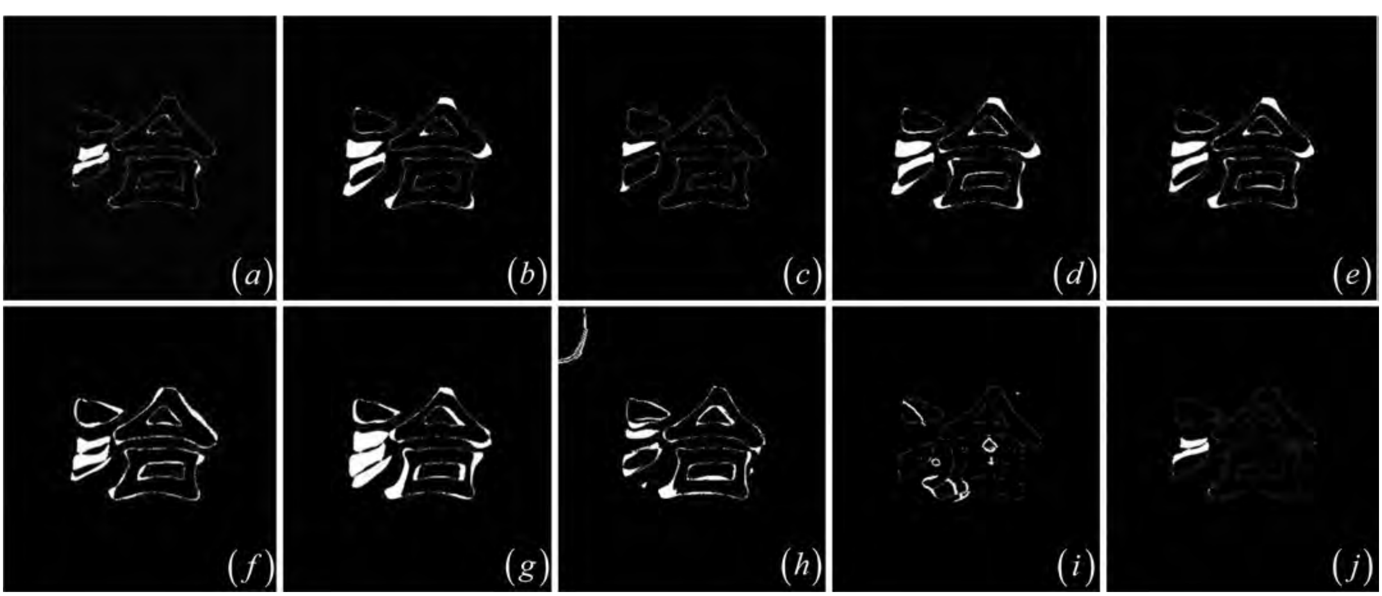

Fig. 9. Difference images of Chinese characters from the 10 matching results. (a) Ours, (b) AGS1, (c) AGS2, (d) AMI, (e) DDD, (f) BMI, (g) AMM, (h) EPPM, (i) LDOF, (j) [illegible]NI.

Fig. 10. Mas s a La a a s te ages. (a) a ( ) T e ac as efi to s C ese c a acte s, M c e , a t o a fi e ages. (e)–(g) T e c esо g a a a s M c e , a t o a fi e ages a a - ase eg st ato e o e a ato . (F te etato o t e e e ces o t e t, t e ea e s e e e o t e e es o t e a t c e.)

e sto e(t e) t e e t a to o g age as ss g c esо e ce (see t e e o es Fig. 8(a) a ( )). M e e, t e t a g a a t e ecta g ao e gs at t e g t a to t e c a acte a e a o e . T e o ca a ge e ato s a e a a e t ato e

Fig. 11. M c e age eg st at . T e o o se a NI et o s te t e t e et s. (a) a ( ) T e e e e ce a o g ages, (c) s, ( ) AGS1, (e) AGS2, ( ) AMI, (g) DDD, ( ) BMI, ( ) AMM, ( ) EPPM, ( ) LDOF, ( ) NI. (te etat o t e e e e ces o te t, t e ea e s e e e t e e es o t e a t c e.)

es e ces t et o eg o t e o st e at e age t a c s o ca a ge e at s t at a e ca se a s t a te t o ese c . A s ccess eg ste e es t s case s o s o o t t e t o eg a s o g e- o e at e a t ss es (see t e e o es Fig. 12) a c g t e o st e at e age st ct es eg a ess t o ese c . V s a s e c as e ea e t at t e o o se a

Fig. 12. B a t o a ge e g st at o . T e o o se a AMI et o s o t e o t e et o s. (a) a ( ) T e e e e ce a o g a ges, (c) o s, ( ) AGS1, (e) AGS2, ( ) AMI, (g) DDD, ( ) BMI, ( ) AMM, ( ) EPPM, ( ) LDOF, ( ) F NI. (F te eta o o t e e e e ces t co o te t, t e ea e s e e t e e e s o o t e a t c e.)

gets ette e ato s o st st ct es t a t e DDD a BMI et o s (F g. 13(g) a ( )), t a o a a e t t o ces o e a t a cts t e eta s o t e e g ste e o g a ge. T e EPPM et o (F g. 13( )) st o ces a o o o g c a ge t e eta s.

T e MREs a SDs o t e a a se ecte a a a s (F g. 10(e)–(g)) o t e 10 et o s t e t ee g a sca e a ge e g-st at o a e ste Ta e 1. Beca se t e EPPM et o o ce o o o g c a ges a e a t a cts a t ee e e e ts s c t at e ca o t fi t e co es o g a a s t e e e o g a ge, EPPM s e g st at o e o s a e a a-a e Ta e 1. T e o o se a F NI et o s o t e M c e a ge atc g ac e e t e s a est a se co s a est e g s-t at o e o s o 1.27 ± 3.09 a 1.76 ± 2.96 e s, es ect e , e t e e g st at o e o s o AGS1, AGS2, AMI, DDD, BMI, AMM, a LDOF et o s a e g eate t a o e a o 1.87 ± 3.11 e s. T ese a a - ase e a ato es ts a e co s ste t t t e a o e- e to e s a e a ato es ts.

As o t e a a ges, t e ss g co es o e ces es te o a t o ese cto e e t s fice t

Fig. 13. [illegible] AGS1, (e) AGS2, [illegible] AMI, (g) DDD, [illegible] BMI, [illegible] AMM, [illegible] EPPM, [illegible] LDOF, [illegible] NI. [illegible]

[illegible]

[illegible]

Table 2
tat t e se t e 10 eg st at et s (I te (R) e(TM) 5-4460 Q a - e 3.2 GHz CP , RAM 4.0 GB).

Cases	O s	AGS1	AGS2	AMI	DDD	BMI	AMM	EPPM	LDOF	NI
1	17.67	3563	30.67	13.99	4.42	11.41	13.99	0.79	41.23	4.02
2	18.83	3521.5	54.64	21.52	4.99	16.14	17.29	0.90	55	2.99
3	35.86	3761.5	33.88	15.69	8.97	32	14.94	0.90	84.43	4.53
4	14.67	3271.3	26.16	8.56	4.08	30.57	2.85	0.74	68.48	2.82

P ese t , t e state -a t eg st at et s t e et e s ste es e st t e a st t es a t e at ss gt t e e s. e a - e, s e gt t e st t es zat st et ee t e ages AMM, s st as g st ateg s t e g acc ate at c sa e st - t es t ss g es e es a a ge at s. e e , t e st t es a t e at s ste es a e e e e eg ess a at fie s t e se et stt e st t e atc g e a e.

Table 2 sts t e tat t e ee e t e 10 a g t s at t e age eg st at s, e e t e age e t ase 1–3 s 372 × 392 e s, a t at ase 4 s 384 × 288 e s. A t e 10 et s a e ate a PC I te e 5-4460 Q a - e 3.2 GHz CP t 4 GB e .

4. Conclusion and discussion

I t s a e , e te sa e a eac age ase t e ss a t et ee e g g st t e te s ate t e sa e st e st , a se e JSM es et e atc g eg ee et ee t et sa e a s at e e e a t e a g e s t e t ages. T e JSM g es t e a a t e e e eg ess t e e se at fie e st acc ate atc g st t es e s ess g t e e ects t e g age eg st at . T e se et a a es t e eg es- s e e a a t e t e JSSs t e t ages t a e e e age s sa e st t es. T ese st ateg es e a e t e se a g t ac e g t e acc ac a st ess st t e atc g t ss g es e es a a ge at s.

Ne e t e ess, t e e a e st e ss es t at ee e t e a esse t e . F st , t e sca eg ess e e Se 2.3 s set as a sta t a e (1.5) t e sa e s c t at eac a t cGa ss a e e . As s e eg ste e es ts, e e , t e at e s a sca e st t es (s c as t ee es t e age at F g. 7) a e e e ecte e at a t e at t es g a ge sca e st t es. T ss t at s ca se t e c a ge a e sca es. I ee , t e sca e (t e t e e) t st e e sc ete s a e e t e s t t g t e e st t e se at e s. T e , t e e sca e s g fica t e ects t e fi a eg st at es t. A se -a sta e sca e a a g t e st t e e t es se ecte a at a st t e e sc ete s a e e t e s a t c at g t e at e st . T e est e ge, a st atte as ee a t e se - a sta e sca e g age eg st at g t e ast e a e.

Se , as t e s et c s g age eg st at [45,48], t e ss g es e es a a ge at s a e t ea st g eg st at et e c g t e s et c c st t e atc g. Mea e c e t ses t e at e e e ages st t e e t e a t c e- e es g e e eg ess , c e e ts t e s et c c eg st at st ateg . e e , s - et s es e est at g t e sta e et ee e e e a g st t es t e t ages a a es s ts e- e e t a t a e s sa s t c age s " e e e " g . e e , e a t a ze et t e s et c e c eg st at a g t s fi t e ca st t es t a s et c e c atc g t es - se e t JSS a a t e e e eg ess .

At ast, t e e e e ta esea c es a e e e g e t g tests 3D st t e atc g. At ese t, t e e a g se a at 3D st t e atc g e a e as a e e t ea se ca ate e e e sta a 3D age ata sets. T g t e e a e t c 3D age ata DIR-La [50][10] a POPI [51],[11] t t e a t eet t e - g t c a e ges. T e es e e e 3D age ata test 3D st t e atc g s e ect t e t a e ges: (1) ese t g t e st t es t t ss g es - e es a a ge at s; (2) a g e e t- efi e es g st a a a s t ese age ata sets, t e eat st e atc g e e t se e s est - ate t e s ata a a e eat e e t fi at .

Acknowledgments

T s ass te t e Nat a Nat a Sc e ce - at C a (61271320 a 60872102). T e a t s e t a E a S a ez, Ra ae Ne c eat g t e atc - g a e a a a t e g es se t e e e e ta a t s . T e a t s t a t e e ANTs e t, MIPA , D e c De s, 3D S ce a ITK (http://...) e t. T e a t s e t a es a F se a at . e a e t a t e a - s e e e t e a a e e ts t at g eat e e e t s a e.

References

[1] A. t as, C. Da atz s, N. Pa a s, D a e age eg st at : a s e , IEEE T a s. Me . I a g. 32 (7) (2013) 1153–1190.
[2] T. B , J. Ma , La ge s ace e t ta : esc atc g a - at a t est at , IEEE T a s. Patte A a. Mac . I te . 33 (3) (2011) 500–513.
[3] H. C , A. Ra ga a a , A e t atc g a g t - g eg st a- t , t s. I age e st. 89 (2-3) (2003) 114–141.
[4] . e g, E. Da e , A.A. H te III, R. a , J. G , H. L , M.G. Ma g e, D.H. B a a , J.C. Gee, La a atc g ase et a age a g e t e - c g s a s t eso e e at , Me . I age A a . 18 (2014) 903–913.
[5] . a g, J. Pe , J. S , I e se s ste t - g age eg st at ase st t set atc g, B e . E g. O e 13 (S 2) (2014) S2.
[6] A. M e , . g, t set eg st at : e e t t t, IEEE T a s. Patte A a . Mac . I te . 32 (2010) 2262–2275.
[7] S. sa, .G. K atsc , G a - ase t t: g a ce t a t t e eg- st at t-sets, Patte Re g t. 48 (2015) 368–379.
[8] Q. Sa g, J. a g, . , st - g t eg st at ase eat e- e e a t fi te t e e, Patte Re g t. Lett. 34 (2013) 1557–1565.
[9] . O , C. Da atz s, DRAMMS: D a e Reg st at a Att te Mat c g a M t a-Sa e c e g t g, IPMI 2009 LNCS, . 5636, 2009, . 50–62.

[10] tt :// . - a . /
[11] tt :// . c eat s. sa- . / / - e /

[10] S. Pe as a , H. Fa , Me ca age eg st ato t a t a ata, Me . I age A a . 10 (2006) 452–464.
[11] J. Ma, J.C. . C a , F. Ca te s, A o e ato a s e eo to a o ac o t -te o a a t -a g e e o te se se age , IEEE J. Se . T . A . Ea t O s. Re o te Se s. 5 (2012) 110–124.
[12] B. e , M. Sa c , R. Des a , B. F s c , P. G a , E ects o eg st ato eg - a zato a at as s a esso seg e tato acc ac , Me . I age A a . 12 (2008) 603–615.
[13] R. Ste a es c , O. C o c , G. Ma a a , P.- . B a , N. A ac e, . Pe - ec, N -R g At as to S ect Reg st ato t Pato o g es o C o a B a Ra o t e a , MICCAI 2004 LNCS, o . 3216, 2004, . 704–711.
[14] F.F. Be e se , A.N.T.J. K tte, A.A.C. e Lee , I.M. J ge e -S c z, M.A. V e ge e , J.P. . P , Reg st ato o st ct a ss a ages MRI- ase ac t e a , P s. Me . B o . 59 (2014) 4033–4045.
[15] P. R s o , E. Sa set, I. Ta o s, . e s, A N -R g Reg st ato F a e o t at Acc o ates Rese cto a Ret acto , IPMI 2009 LNCS, o . 5636, 2009, . 447–458.
[16] L. Ta g, G. Ha a e , R. A g a e , Re a t -D e , S at a -A a t e Reg a zato o De o a e Reg st ato , BIR 2010 LNCS, o . 6204, 2010, . 173–185.
[17] N. C t a t a , K.P. V es, J.S. D ca , Reg st ato o B a Rese cto MRI t I te s t a b cato P o s, : 2011 IEEE I te ato a S o s o B o e ca I ag g: F o Na o to Ma o , 2011, . 1520–1523.
[18] I.J.A. S o , J.A. S c a e , A.R. G o es, J.L.R. A e so , M. . oo c , P o - a st c e e ce o eg a sato o - g eg st ato , Ne o I age 59 (2012) 2438–2451.
[19] M. F s e , B. Da s, L. G a , S. C a g, E. C a e , N. St e , S. T e , J. R se a , S. J s , La ge e o ato 3D age eg st ato age-g e a ato t e a , P s. Me . B o . 50 (24) (2005) 5869–5892.
[20] S. Ga , L. a g, H. a g, R. e C e o s e , D.D. K a , R. M a , L. D g, A e o a e age eg st ato eto to a e ste e ect s o state ca ce a o t e a , Me . P s. 33 (9) (2006) 3304–3312.
[21] M. Ba c C a a, M. De C ae e, V . D a , B. Ma c , C. B o , J.-P . T a , De se e o ato fie est ato o at as- ase seg e tato o ato o g ca MR a ages, C t. Met o s P o g a s B o e . 84 (2006) 66–75.
[22] E.I. ac a a , C.S. H gea, D. S e , G. B o s, C. Da atz o s, N - e o c eg st ato o a t o ages s at g t ss e o ss a t o g o t , Ne o I age 46 (2009) 762–774.
[23] A. Ma g, S. Be c e , A. T a, T. B z g, C g t o g o t t a e o - ato : a c st a e a a et c o - g eg st ato o e , : Me ca I ag g 2010: I age P o cess g, P o c. SPIE 7623 (2010), 76230C-1-12.
[24] M. S a, D. Pe et e , N g eg st ato o t e sc e o s s a ages s g es o a t g o o o et o es o a g, H . B a Ma . 30 (4) (2009) 1060–1067.
[25] M. B ett, A.P. Le , C. R e , J. As e , S at a o a zato o a ages t o ca es o s g c st cto as g, Ne o I age 14 (2) (2001) 486–500.
[26] S.M. A e se , S. . Ra csa , P.M. Bee o , C st cto as g g o a- zato o a s t o ca es o s: st a e cess t , Ne o I age 53 (1) (2010) 78–84.
[27] P. R o es, J. Ma c -Pa a es, R. e D eg -Ba a g e , J. M o , M. Fa , M. J ca e a, F. R o , A. R g ez-F e s, A a s so a to ate et - o s o s at a o a zato o es o e a s, Ne o I age 60 (2) (2012) 1296–1306.
[28] V . Kat o , A. F , K. Eg aza a , J. As to a, F o o ca e e to o o ca t e- o e age e o s g, I t. J. C t.