Fondamenti di Elaborazione di Immagini

Template Matching

Raffaele Cappelli

raffaele.cappelli@unibo.it

Contenuti

- Introduzione
  - Confronto diretto fra immagini e template matching
  - Panoramica approcci di template matching
- Correlazione
  - Definizione
  - Misure di correlazione normalizzate
  - Analisi della complessità computazionale
  - Approccio multi-risoluzione
  - Alcuni esempi pratici
- Tecniche avanzate di template matching
  - Cenni ad argomenti trattati in Visione Artificiale e Riconoscimento

Confronto diretto fra immagini

- Ogni immagine potrebbe essere semplicemente considerata come un punto in uno spazio multidimensionale
  - Un'immagine grayscale corrisponderebbe quindi a un vettore con *n*=WxH dimensioni
- Il confronto diretto di immagini, mediante distanza fra tali vettori nello spazio, in generale non funziona per una serie di ragioni, fra cui:
  - Differenze di traslazione, rotazione, scala e prospettiva
  - Deformazione e variabilità dei pattern
  - Cambiamenti di illuminazione
  - Presenza di rumore nelle immagini e utilizzo di tecniche di acquisizione diverse

Template matching

- Anziché tentare di confrontare direttamente due immagini, si costruiscono uno o più pattern modello (template) e li si "ricerca" all'interno dell'immagine, misurandone il grado di "somiglianza" (matching) in tutte le possibili posizioni

I

Immagine di riferimento

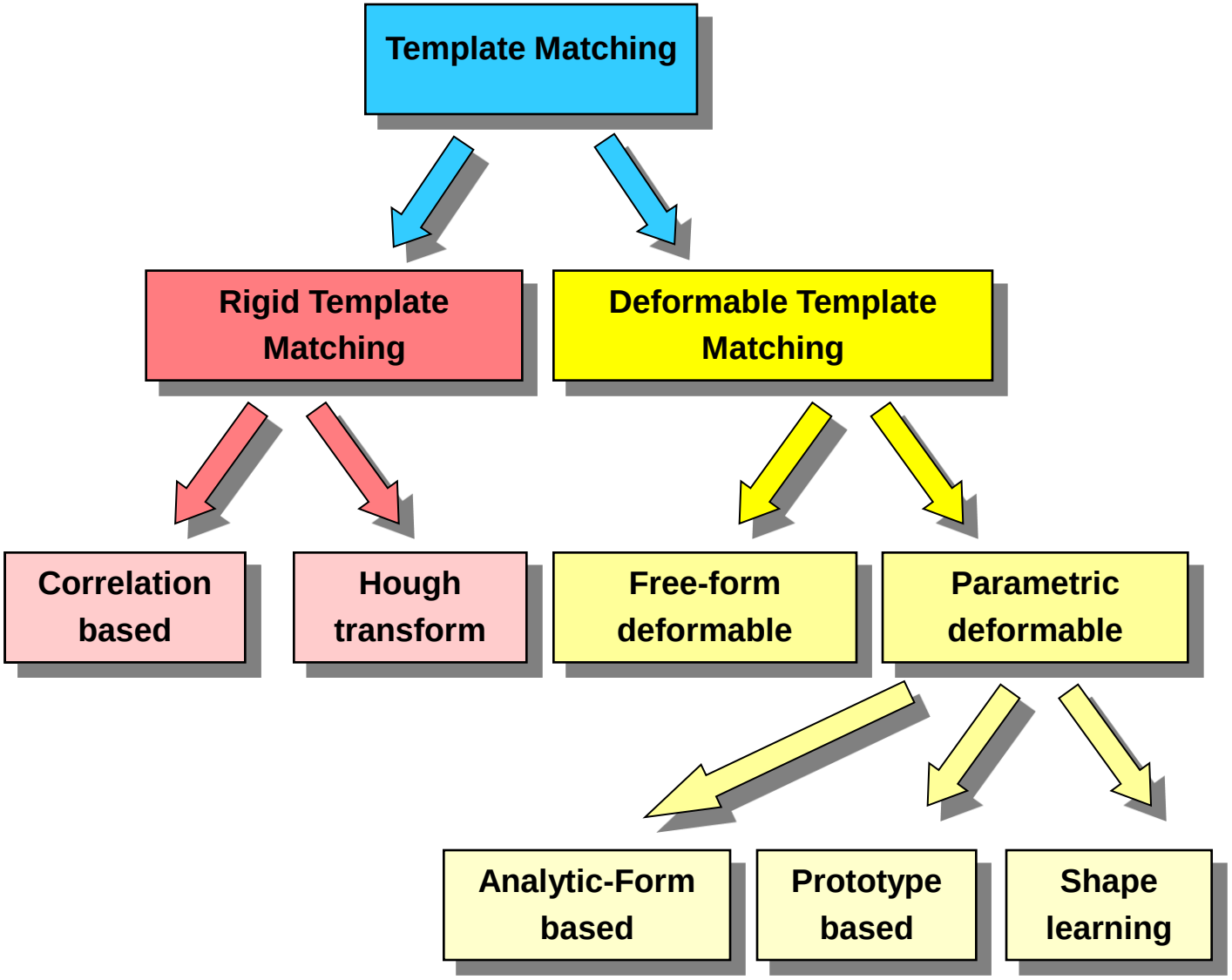
T_1

T_2

2 template

la posizione (ideale) di massima somiglianza per i due template all'interno dell'immagine

Template matching – Panoramica approcci



Template matching "rigido"

- Il template T è costituito da un oggetto rigido
  - Normalmente una piccola immagine in formato raster: il confronto avviene direttamente fra i pixel; tuttavia, a seconda dell'applicazione, *potrebbe essere più efficace eseguire il template matching dopo aver estratto determinate feature* (es. gli edge, oppure l'orientazione del gradiente)
- T viene sovrapposto a I in tutte le possibili posizioni (rispetto agli assi x e y), ma, a seconda dell'applicazione, può essere anche necessario operare delle trasformazioni (ad es. ruotarlo e/o scalarlo).
  - Nel seguito si indicherà con T_i una generica istanza di T ottenuta con una data trasformazione.
- Per ogni istanza T_i, il grado di similarità viene solitamente calcolato massimizzando la correlazione con la porzione di immagine I "coperta" da T_i.
  - Normalmente i template hanno dimensione inferiore all'immagine
  - Analogamente alla convoluzione, è necessario decidere come comportarsi sui pixel di bordo (ossia dove T_i non è completamente contenuto in I)

Correlazione

- Definizioni
  - Data un'immagine I e un'istanza T_i del template, sia I_{xy} la porzione di immagine con le stesse dimensioni di T_i centrata nel pixel (x,y)
  - Nel seguito, per semplicità di notazione, I_{xy} e T_i indicheranno i *vettori* ottenuti *concatenando le righe* delle due immagini rettangolari corrispondenti
- *SSD* e *CC*
  - Una misura intuitiva di diversità fra I_{xy} e T_i è la Sum of Squared Differences (*SSD*):

$$SSD\left(\mathbf{I}_{xy},\mathbf{T}_i\right)=\left\|\mathbf{I}_{xy}-\mathbf{T}_i\right\|^2=\left(\mathbf{I}_{xy}-\mathbf{T}_i\right)^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{I}_{xy}-\mathbf{T}_i\right)=\left\|\mathbf{I}_{xy}\right\|^2+\left\|\mathbf{T}_i\right\|^2-2\,\mathbf{I}_{xy}{}^{\mathrm{T}}\mathbf{T}_i$$

  - se le norme di I_{xy} e T_i fossero costanti, *minimizzare* la *SSD* equivarrebbe a *massimizzare* la Cross Correlation (*CC*):

$$CC\left(\mathbf{I}_{xy},\mathbf{T}_i\right)=\mathbf{I}_{xy}{}^{\mathrm{T}}\mathbf{T}_i=\sum_k \mathbf{T}_i[k]\cdot\mathbf{I}_{xy}[k]$$

Correlazione (2)

- Misure di correlazione normalizzate
  - Necessarie, quando I_{xy} e T_i non sono costanti:
    - Diverse regioni della stessa immagine raramente lo sono
    - Istanze dello stesso template diverse tra loro per numero di pixel e luminosità media
- *Normalized SDD* (*NSDD*) e *Normalized CC (NCC)*
  - Sono *indipendenti dal contrasto* di immagine e template. Infatti pattern a più elevato contrasto (caratterizzati da ampio range di livelli di grigio) vengono ritenuti dalla semplice *SSD* più dissimili rispetto a pattern con scarso contrasto.
- *Zero-mean NSDD (ZNSDD) e Zero-mean NCC (ZNCC)*
  - Rispetto a *NSSD* e *NCC* sono invarianti anche per pattern che, a parità di contrasto (stesso range dinamico), presentano *luminosità medie* diverse.

$$NSSD\left(\mathbf{I}_{xy},\mathbf{T}_i\right)=\frac{\left\|\mathbf{I}_{xy}-\mathbf{T}_i\right\|^2}{\left\|\mathbf{I}_{xy}\right\|\cdot\left\|\mathbf{T}_i\right\|}$$

$$NCC\left(\mathbf{I}_{xy},\mathbf{T}_i\right)=\frac{\mathbf{I}_{xy}^{\mathrm{T}}\mathbf{T}_i}{\left\|\mathbf{I}_{xy}\right\|\cdot\left\|\mathbf{T}_i\right\|}$$

$$ZNSSD\left(\mathbf{I}_{xy},\mathbf{T}_i\right)=NSSD\left(\mathbf{I}_{xy}-\bar{\mathbf{I}}_{xy},\mathbf{T}_i-\bar{\mathbf{T}}_i\right)$$

$$ZNCC\left(\mathbf{I}_{xy},\mathbf{T}_i\right)=NCC\left(\mathbf{I}_{xy}-\bar{\mathbf{I}}_{xy},\mathbf{T}_i-\bar{\mathbf{T}}_i\right)$$

Correlazione – Implementazione di base

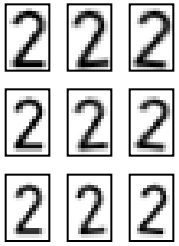
```
[...]
if (T.Width * T.Height > int.MaxValue / (255 * 255))
   throw new Exception("Template troppo grande per calcolo intero a 32 bit");
[...]
res = new Image<int>(I.Width, I.Height);
int tw = T.Width;
int th = T.Height;
int mw2 = T.Width / 2;
int mh2 = T.Height / 2;
int y1 = mh2;
int y2 = I.Height - mh2 - 1;
int x1 = mw2;
int x2 = I.Width - mw2 - 1;
// Esegue la correlazione (i bordi restano inizializzati a zero)
for (int y = y1; y <= y2; y++)
    for (int x = x1; x <= x2; x++)
    {
        int val = 0;
        for (int yt=0;yt<th;yt++)
            for (int xt=0;xt<tw;xt++)
                val += (int)I[y-mh2+yt,x-mw2+xt] * T[yt,xt];
        res[y,x] = val;
   }
```

N.B. Un'implementazione più efficiente dovrebbe evitare l'accesso ai pixel con [y,x] (utilizzando indici lineari) e cercare di evitare calcoli inutili, ad esempio precalcolando gli offset del template.

Complessità computazionale

- Un esempio: riconoscimento di targhe
  - Immagine: 512x256

  - Template: 10 cifre e 26 caratteri
    - Risoluzione 13x20 pixel.
    - Per ogni cifra e per ogni carattere consideriamo 9 istanze dovute a variazioni di scala (diverse distanze dalla telecamera) e rotazione.

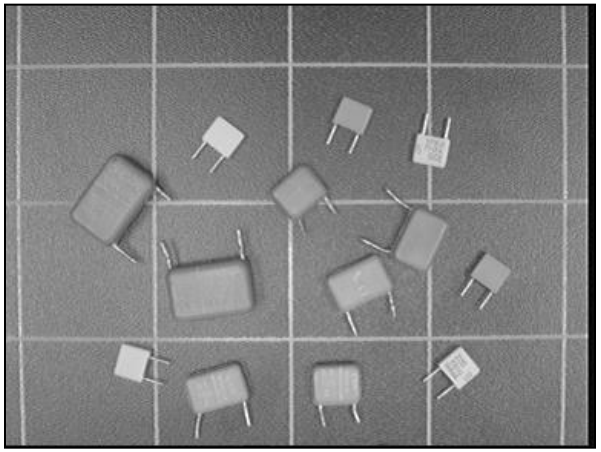


    - Ogni istanza (324 istanze = 36x9) deve essere sovrapposta all'immagine in tutte le possibili posizioni e genera quindi ulteriori 512x256 istanze (se si trascurano i bordi).
    - Pertanto occorre stimare circa 42.467.328 = 324x512x256 correlazioni, ciascuna richiedente almeno 13x20 moltiplicazioni e altrettante somme (nel caso di semplice CC). In totale circa 11×10^9 moltiplicazioni (intere) e altrettante somme.
  - Quanto tempo occorre per processare un'immagine?
    - Almeno 44 secondi su una macchina capace di eseguire 500 milioni di operazioni intere al secondo.

Correlazione – Problematiche

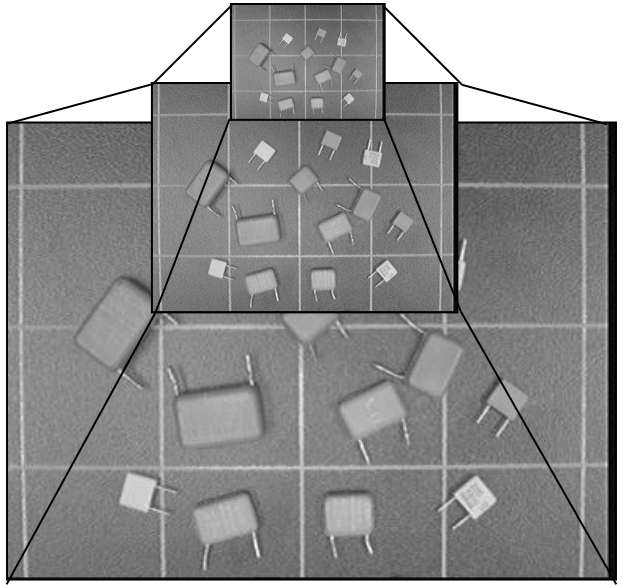
- Complessità computazionale
  - Il numero di operazioni richieste cresce linearmente con il numero di istanze e con il numero di pixel di I e T (e quindi quadraticamente rispetto al lato di I e di T).
  - In pratica, per applicazioni real-time, l'approccio di base è raramente applicabile.

- Difficile gestione di pattern deformabili
  - Esempio: localizzazione di un componente elettronico
    - Necessaria invarianza per posizione, rotazione, scala e aspect ratio (lunghezza/altezza). Ciò implica un enorme numero di istanze!
    - Come gestire le variazioni di colore? (si potrebbe operare sugli edge e non sui pixel)
    - Come gestire le deformazioni locali (ad esempio i piedini piegati o di diversa lunghezza)?



Correlazione: approccio multi-risoluzione

- Obiettivo: ridurre la complessità computazionale
  - Si segue la ricerca su una gerarchia crescente di risoluzioni
  - Viene creata una “piramide” di risoluzioni sia per I che per T (ad esempio dimezzando la risoluzione ad ogni livello)
  - La ricerca viene eseguita inizialmente sulla risoluzione più bassa, e ai livelli successivi vengono analizzate solo le istanze promettenti (la cui correlazione al livello inferiore eccedeva una data soglia)



- Vantaggi
  - Consente di eseguire una “scrematura” ai livelli iniziali e di perfezionare la localizzazione e filtrare “false somiglianze” ai livelli successivi
  - Esemplificando:
    - A metà risoluzione le operazioni si riducono di 16 volte.
    - A 1/4 quarto di risoluzione di 256 volte.
    - A $1/2^n$ di risoluzione di 2^{4n} volte, ma tipicamente oltre a 3, 4 livelli non è possibile operare per mancanza di dettagli

Approccio multi-risoluzione – Esempio

- Si consideri il caso del riconoscimento di targhe visto in precedenza (immagine 512x256, 36x9 istanze di template)
  - L'applicazione della ZNCC (con un'implementazione mediamente efficiente in C#) richiede 70.8 secondi su una CPU a 2.0GHz
  - Applicando l'approccio multirisoluzione con 2 livelli e impostando la soglia in modo da considerare al secondo livello circa l'1% delle correlazioni più promettenti del primo livello, i tempi risultano essere:
    - 4.3 secondi per la correlazione al primo livello (come era logico fosse!)
    - 1.5 secondi per la correlazione al secondo livello (dimensioni originali)
    - 0.3 secondi per selezionare le istanze da analizzare al secondo livello

Le posizioni selezionate al primo livello per una particolare istanza di un template

Tecniche avanzate di template matching

- Template matching rigido
  - Correlazione nel dominio delle frequenze
    - Analogamente al caso della convoluzione, è possibile utilizzare la trasformata di Fourier per calcolare la correlazione in maniera più efficiente [→ VAR]
  - Trasformata di Hough
    - Nella sua versione originale, si tratta di un metodo piuttosto robusto per individuare linee rette in un'immagine [→ VAR]
    - Può essere generalizzata per ricercare figure di forma arbitraria in un'immagine (es. circonferenze, ellissi, ...)

Tecniche avanzate di template matching (2)

- Template matching deformabile
  - Free-form deformable
    - Il template non è vincolato a forme precise. Si fa uso di un potential field, cioè di una funzione di energia prodotta dalle feature salienti dell'immagine, per guidare il processo verso le deformazioni maggiormente significative. [→VAR]
  - Parametric deformable
    - Il template è parametrico (ad esempio formato da archi, curve spline, ...) e regolato da un numero limitato di parametri, agendo sui quali si ottengono deformazioni controllate. [→VAR]
  - Shape learning
    - Le possibili variazioni della forma del template (e i corrispondenti gradi di libertà) vengono "appresi" in modo automatico a partire da un insieme di esempi rappresentativi delle possibili variazioni dell'oggetto che il template deve rappresentare. [→VAR]