



# Low Level Vision: Texture

Prof. Sebastiano Battiato

Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato

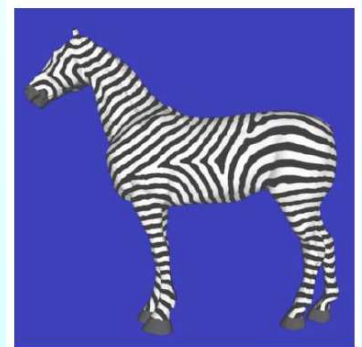


## Texture: Preliminari

Una regione in un'immagine è detta **textured** se presenta caratteristiche di **omogeneità** relativamente alle sue caratteristiche percettive (intensità luminosa, saturazione, regolarità strutturale ecc.).

Ovviamente lo studio e l'analisi di tessiture in *Computer Vision* diventa tanto più problematico quanto più complessa è la scena in cui essa viene a trovarsi.

Le tessiture reali inoltre risultano essere per la maggior parte costituite da elementi strutturali di base, detti **texton** la cui regolarità è per lo più di natura **stocastica (Pattern Grafici)**



Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato



## Texture: Preliminari

Le tessiture, possono essere viste come campioni di distribuzioni di probabilità (non note) e vengono tipicamente analizzate con i mezzi propri della statistica. Si tende cioè a caratterizzare in maniera più o meno esplicita la legge statistica, o il che è lo stesso, il modello di probabilità da cui l'immagine stessa è stata generata.

Riuscire in questo intento è spesso difficile in situazioni reali, soprattutto quando la conoscenza del processo generativo di base, è parzialmente o del tutto sconosciuto. Nasce quindi l'esigenza di utilizzare tecniche capaci di apprendere le caratteristiche peculiari del *pattern* e di riprodurne esemplari simili almeno dal punto di vista percettivo.



## Texture: Preliminari

Esistono inoltre chiare evidenze sperimentali nel campo delle scienze cognitive che portano a considerare l'analisi di tessiture come una delle specializzazioni del sistema visivo umano.

La ricerca di base sulle tessiture è stata avviata da Julesz (1962) che pubblicò un articolo riuscendo a focalizzare, attraverso semplici quesiti, quelli che a tutt'oggi sono i principali obiettivi che ci si propone di raggiungere nello studio delle tessiture.



## Texture

Diversi tentativi per caratterizzare in termini esatti e formali il concetto primitivo di *pattern* (di tessitura o *texture*) sono stati fatti in passato; tutti comunque presentano dei limiti e sono spesso applicabili solo in contesti specifici.

In generale è però possibile osservare come un gran numero di fenomeni naturali presentino una qualche regolarità di natura **stocastica** nonostante lo stesso fenomeno risulti essere per sua natura non predicibile o addirittura sconosciuto.



## Texture: Preliminari

Esempi tipici di *texture* sono ad esempio l'immagine di una scacchiera o la pelle di un leopardo.

Risulta chiaro come comunque il concetto di **omogeneità** o di **regolarità** non è oggettivamente definito in quanto ha a che fare con le **peculiarità percettive** di ogni singolo individuo.

## Texture: Esempi (1)



Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato

## I Quesiti di Julesz

Il primo riguarda l'individuazione delle **caratteristiche peculiari o statistiche** che individuano univocamente un *pattern* grafico, una *texture*, tali cioè da caratterizzarne l'indiscriminabilità percettiva.

Il secondo, più specificatamente rivolto all'ambiente matematico/statistico, si chiede come riuscire, una volta individuato un insieme di caratteristiche o **feature** di tipo statistico, a generarne campioni pseudo-casuali che ne seguano e/o ne condividano, riproducendone l'andamento, tali proprietà di base.

Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato

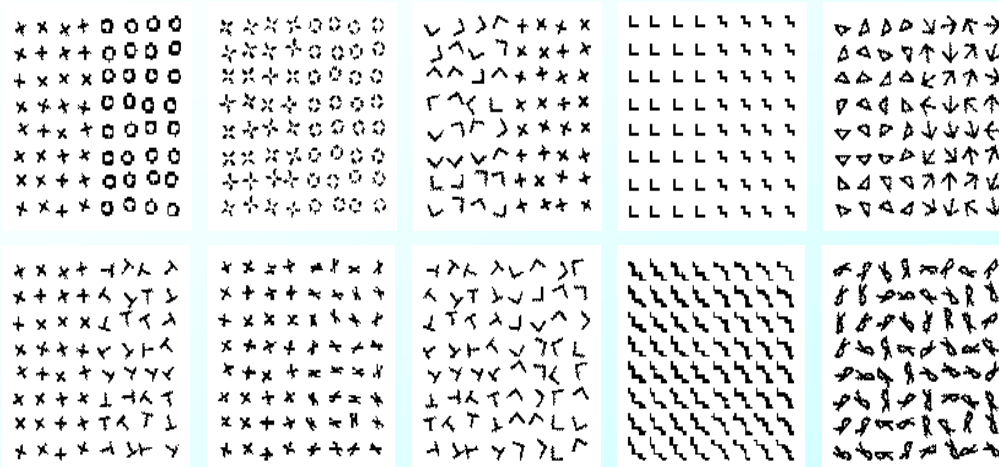
# Texture e Computer Vision

La ricerca di base analizza le tessiture cercando di caratterizzarne la regolarità intrinseca catturandone così in maniera esplicita le specifiche peculiarità.

I principali obiettivi e compiti che in tale ambito ci si prefigge sono:

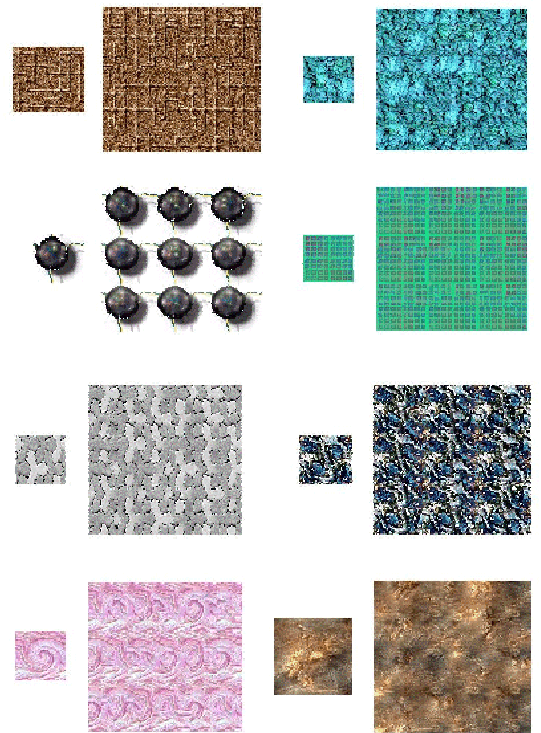
- La **Discriminazione** o **Detection** di una tessitura in un'immagine che tende a separare, trovandone i bordi, le zone con tessiture differenti. Questa operazione può risultare particolarmente complicata in presenza di informazioni legate solamente all'intensità dei *pixel* dell'immagine;

# Texture Discrimination



## Texture: Analisi e Sintesi

- L'**Analisi** e **Sintesi** di tessiture che si propone invece di analizzare la natura stocastica della tessitura stessa, con lo scopo di riuscire a catturare, in maniera più o meno diretta, il processo generativo intrinseco che la caratterizza; in questo modo si riescono a riprodurre, nella fase di sintesi, *texture* che percettivamente appaiono differenti dall'originale pur appartenendo alla stessa classe statistica di base. Si veda ad esempio la Figura successiva dove sono riportati a titolo esemplificativo alcuni esempi di sintesi di tessiture.



Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato

## Texture: Classificazione

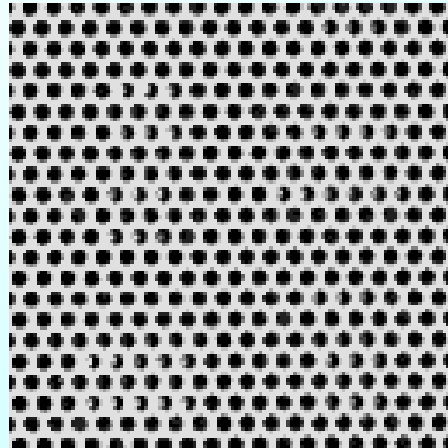
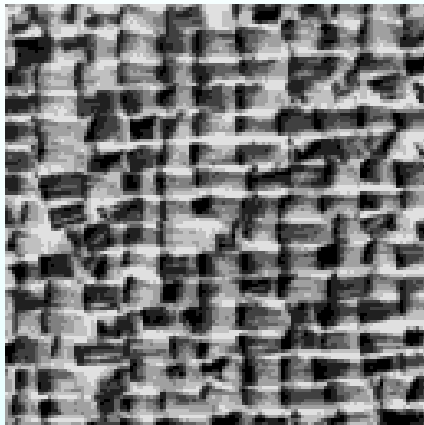
La **Classificazione** che tende appunto a classificare le tessiture ed è in questo senso strettamente legato alla operazione di analisi. Classificare una tessitura è molto più difficile che discriminarla. Infatti la stessa tessitura può apparire in un'immagine in modi anche assai diversi tra loro, e ciò dipende ovviamente dal **grado di luminosità**, **dall'angolazione**, **dalla scala di risoluzione**, ecc. In un certo senso bisogna quindi riuscire a comprendere la **semantica** della tessitura stessa per poterla ben classificare.

In quest'ambito è possibile individuare applicazioni che riguardano ad esempio il riconoscimento di immagini satellitari SAR (*Synthetic Automatic Radar*)

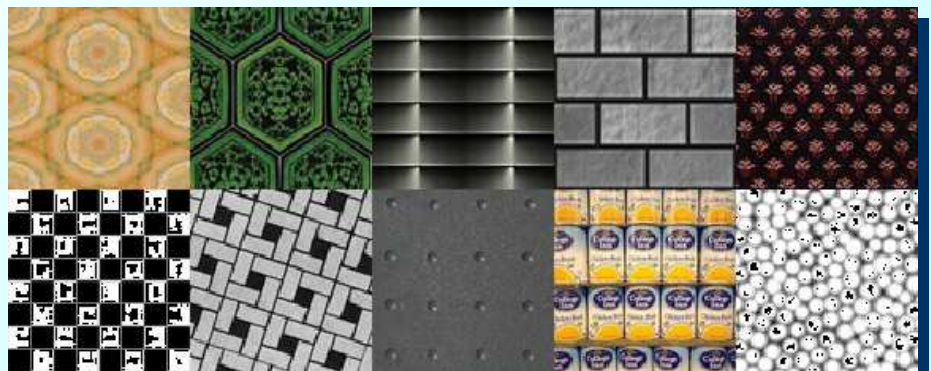
Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato

# Classificazione

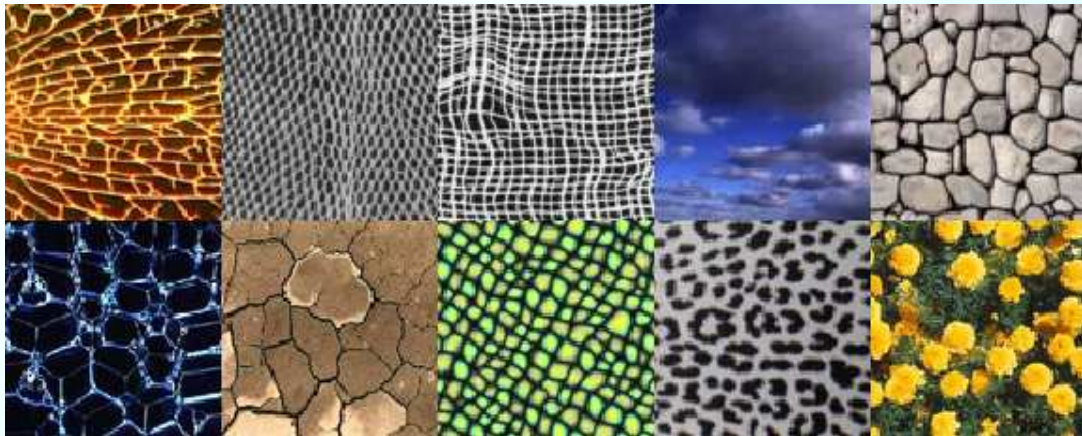
Distinguiamo poi le texture **stocastiche** da quelle **deterministiche**



## Stocastiche vs deterministiche



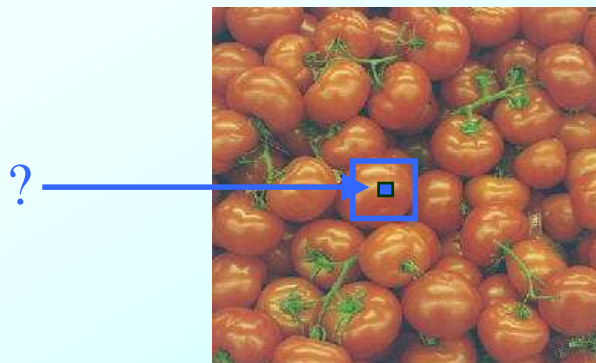
## Texture Weakly-homogeneous



Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato

## Texture: “Località”

- Ciascun pixel di una texture è caratterizzato da un piccolo insieme di pixel dell'intorno locale

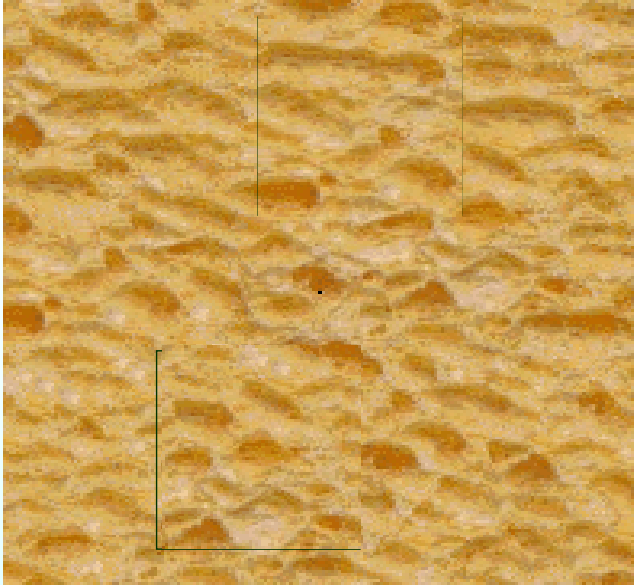


Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato



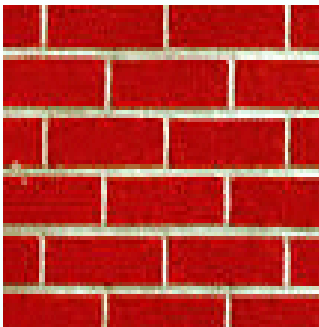
# Texture - "Stazionarietà"

Differenti regioni sono percepite come simili



# Ancora tipologie di Texture

Periodic



Semi-periodic

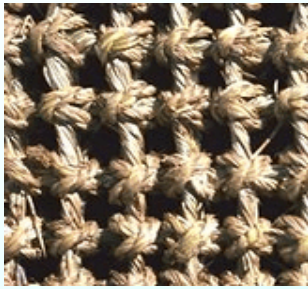


Stochastic



## Ancora tipologie di Texture

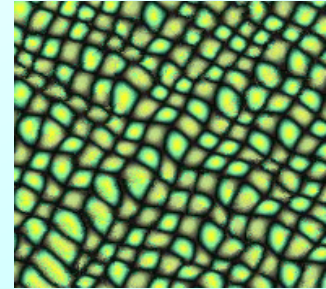
Artificial



Natural



Synthetic



## Analisi di Texture

L'approccio di natura probabilistica/statistica è relativamente recente; i primi lavori in questo campo non consideravano affatto le tessiture come campioni estratti da distribuzioni di probabilità. L'approccio più comunemente utilizzato era quello di cercare di riprodurre artificialmente il processo fisico, che stava dietro alla tessitura sotto osservazione.

L'obiettivo ideale in questo campo, così come enunciato dallo stesso Julesz, sarebbe quello di riuscire a trovare una sorta di teoria del *tristimolo* che, come noto, afferma che un qualsiasi colore visibile può essere univocamente determinato mediante una combinazione lineare di tre colori di base. Nella teoria delle tessiture ciò equivarrebbe a trovare le giuste **feature** statistiche di base da combinare opportunamente tra di loro secondo una data modellizzazione matematica.





## Texture

Gli approcci principali per la descrizione della texture sono l'approccio **statistico**, quello **strutturale** e lo **spettrale**.

- I metodi **statistici** portano alla caratterizzazione delle strutture come lisce, ruvide, granulose e così via.
- Le tecniche **strutturali** si occupano della disposizione delle primitive d'immagine.
- I metodi **spettrali** sono basati sull'analisi dello spettro (Fourier) dell'immagine in modo da individuare periodicità presenti nella stessa. Le periodicità cercate si manifestano nello spettro come picchi stretti che portano con se un alto contenuto energetico.



## Metodi statistici

Poniamo che  $z$  sia una variabile aleatoria che rappresenta l'intensità di un immagine discreta e poniamo che  $p(z_i)$ , con  $i = 1, 2, \dots, L$ , sia l'istogramma corrispondente, dove  $L$  è il numero dei diversi livelli d'intensità.

L' $n$ -esimo momento di  $z$  intorno alla media  $m$  è definito

come: 
$$\mu_n(z) = \sum_{i=1}^L (z_i - m)^n p(z_i)$$

dove

$$m = \sum_{i=1}^L z_i p(z_i)$$

Il momento del secondo ordine (detto varianza e rappresentato da  $\sigma^2$ ) fornisce una misura del contrasto nell'intensità che può essere usata per stabilire i descrittori della **smoothness** relativa.

Ad esempio, la grandezza

$$R=1-\frac{1}{1+\sigma^2(z)}$$

è 0 per le aree di intensità costante e si avvicina a 1

per grandi valori di  $\sigma^2(z)$ .

Anche i momenti di ordine più elevato (ma in genere non oltre il 5° o il 6°), anch'essi correlati alla forma dell'istogramma, possono essere utilizzati per la costruzione di misure della tessitura, e quindi per la discriminazione tra regioni a tessitura diversa

Facendo uso soltanto degli istogrammi tali misure risentono del fatto che non danno alcuna informazione riguardante la posizione relativa dei pixel.

Un modo per ottenere questo tipo di informazione consiste nel considerare non solo la distribuzione delle intensità ma anche la **posizione** dei pixel con valori in intensità identici o quasi uguali.



## Metodi Statistici

Poniamo che  $P$  sia un operatore di posizione e che  $A$  sia una matrice  $k \cdot k$  il cui elemento  $a_{ij}$  corrisponde alla popolazione di punti con intensità  $z_i$ , nella posizione determinata da  $P$  rispetto a punti di intensità  $z_j$

Ad esempio,  $a_{13}$  indica il numero di punti di intensità  $z_1$  che si trovano nella posizione determinata da  $P$  rispetto a punti di intensità  $z_3$ .



## Metodi Statistici

Per esempio, consideriamo un'immagine codificata secondo tre livelli di intensità,  $z_1=0$ ,  $z_2=1$ ,  $z_3=2$ :

0	0	0	1	2
1	1	0	1	1
2	2	1	0	0
1	1	0	2	0
0	0	1	0	1

Se definiamo l'operatore posizione  $P$  come "un pixel in basso a destra", otteniamo la seguente matrice  $A_{3,3}$ .

$$A = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 2 \\ 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

Poniamo  $n$  pari al numero complessivo delle coppie di punti dell'immagine cui può essere applicata  $P$  (nell'esempio precedente  $n=16$ ).

Definiamo una matrice  $C$  ottenuta dividendo ciascun elemento di  $A$  per  $n$ , allora  $c_{ij}$  è una valutazione della probabilità congiunta che una coppia di punti, che soddisfano  $P$ , abbia valore  $(z_i, z_j)$ .

La matrice  $C$  è detta **co-occurrence matrix della gradazione di grigio**.

Dato che la matrice  $C$  dipende da  $P$ , è possibile rivelare la presenza di determinati tipi di texture scegliendo un operatore di posizione appropriato.

L'operatore usato nell'esempio precedente è sensibile alle strisce di intensità costante con orientazione di  $-45^\circ$ .

In un contesto più generale, il problema discusso si trasforma nell'analisi di una data matrice  $C$ , volta a determinare le caratteristiche della texture della regione da cui è stata ricavata.



# Metodi Statistici

Un insieme di descrittori proposto da Haralick sulla matrice di co-occorrenza comprende:

1. *Probabilità massima* :

$$\max_{i,j} c_{i,j}$$

2. *Momento di ordine k della differenza fra gli elementi* :

$$\sum_i \sum_j (i - j)^k c_{ij}$$



# Metodi statistici

3. *Momento di ordine k dell'inverso della differenza fra gli elementi* :

$$\sum_i \sum_j \frac{c_{ij}}{(i - j)^k} \quad i \neq j$$

4. *Entropia* :

$$- \sum_i \sum_j c_{ij} \log c_{ij}$$

5. *Uniformità* :

$$\sum_i \sum_j c_{ij}^2$$

L'idea base è quella di caratterizzare il "contenuto" della matrice C attraverso i descrittori introdotti.





## Metodi Statistici

Un metodo per utilizzare i descrittori proposti è “insegnare” a un sistema di visione i valori dei descrittori rappresentativi per un insieme di texture differenti.

I descrittori possono essere adoperati calcolando e memorizzando i loro valori per un set di differenti tessiture tipiche (database delle caratteristiche).

Una tessitura incognita può a questo punto essere classificata in base alla distanza tra i descrittori che la caratterizzano e quelli memorizzati nel database delle caratteristiche.



## Metodi Strutturali

I metodi strutturali si basano sul principio che una texture, anche complessa, può essere ottenuta replicando una texture **primitiva** secondo regole che ne limitano il numero delle possibili disposizioni.

Consente descrizioni di tessitura basate su regole sintattiche mediante le quali possono essere espressi i vincoli cui deve soddisfare una struttura simbolica.

Una struttura simbolica può essere una parola o una frase di un linguaggio di programmazione, ma anche una descrizione del modo in cui si ripetono elementi di tessitura o **texel** per costruire una tessitura complessa.

## Metodi Strutturali

Supponiamo di avere una regola  $S \rightarrow aS$  che indica la possibilità di riscrivere il simbolo  $S$  come  $aS$ .

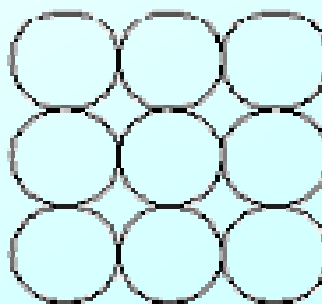
Se poniamo che  $a$  rappresenti un cerchio e stabiliamo che preporre una  $a$  corrisponde ad aggiungere un cerchio a destra, allora la regola  $S \rightarrow aS$  ci consente di produrre un pattern con una texture della forma riportata in figura (tramite la stringa  $aaaa...aS$ ).



## Metodi Strutturali

Supponiamo di aggiungere alcune regole al procedimento in modo che la presenza di una  $b$  significhi “cerchio in basso” e la presenza di  $c$  significhi “cerchio a sinistra”.

Date le regole fissate, la stringa  $aaabccbaa$  corrisponde a una matrice  $3 \times 3$  di cerchi (vedi figura).





## Metodi Strutturali

Il concetto di base dei metodi strutturali sta nella individuazione delle primitive e delle regole con le quali le primitive si compongono per formare il pattern dominante della texture che si sta esaminando.

Quando la regola di composizione delle primitive è ricorsiva, ovvero la primitiva compone la texture seguendo la struttura della primitiva stessa, la texture è detta *autosimilare*. Esempio: Frattali.



## Metodi Spettrali

Lo spettro, ottenuto per mezzo della trasformata di Fourier dell'immagine, è ideale per la descrizione dell'orientazione di pattern 2-D periodici o quasi-periodici.

Le caratteristiche dello spettro di Fourier che lo rendono particolarmente utile nella descrizione della texture sono:

- i picchi più alti dello spettro restituiscono la **direzione** del texture pattern;
- il posizionamento dei picchi nel dominio della frequenza fornisce informazioni sul **periodo** spaziale dei pattern;
- eliminate, tramite un **filtraggio**, le componenti periodiche dell'immagine, si possono descrivere le componenti *non periodiche* tramite una tecnica statistica.



## Metodi Spettrali

Data la natura simmetrica (rispetto all'origine) dello spettro di Fourier, è necessario prendere in considerazione solo metà del piano delle frequenze, di conseguenza ogni **pattern periodico** è associato solo ad un picco nello spettro, e non a due. L'analisi e l'interpretazione dello spettro può essere semplificata esprimendo lo stesso in coordinate polari  $S(r, \theta)$ .

Fissata la direzione  $\theta$ ,  $S(r, \theta)$  può essere considerata una funzione 1-D  $S_\theta(r)$ .

Fissata la frequenza  $r$ ,  $S(r, \theta)$  può essere considerata una funzione 1-D  $S_r(\theta)$ .

$S_r(\theta)$  fornisce l'andamento dello spettro lungo una circonferenza di raggio  $r$  e centro nell'origine, mentre  $S_\theta(r)$  l'andamento lungo una direzione fissata ( $\theta$ ).



## Metodi spettrali

Una descrizione più globale si può ottenere sommando (integrando) le funzioni introdotte come segue:

$$S(r) = \sum_{\theta=0}^{\pi} S_\theta(r)$$

$$S(\theta) = \sum_{r=1}^R S_r(\theta)$$

dove  $R$  è il raggio della circonferenza centrata nell'origine. Queste due funzioni 1-D costituiscono una descrizione basata sul contenuto di energia spettrale della tessitura in una regione o in una intera immagine. Descrittori quantitativi di queste funzioni possono a loro volta essere determinati nel modo usuale (media e varianza, posizione del massimo, ecc.)

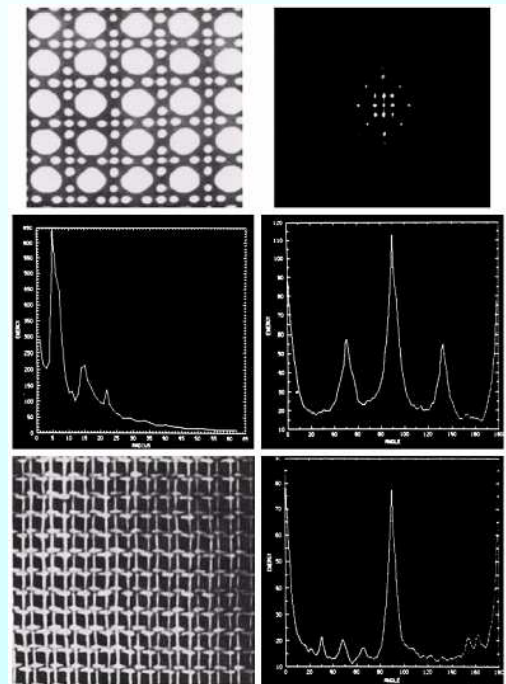
## Metodi Spettrali

Per la tessitura periodica mostrata, sono presentati lo spettro e gli andamenti di  $S(r)$  e di  $S(\theta)$

L'andamento di  $S(r)$  è quello tipico che mostra la concentrazione prevalente dell'energia vicino all'origine

L'andamento di  $S(\theta)$  mostra invece la presenza di picchi prominenti a intervalli di  $45^\circ$ , che corrispondono alla periodicità della tessitura

Per la seconda tessitura mostrata, il cui pattern si sviluppa prevalentemente nelle due direzioni principali,  $S(\theta)$  dà invece una periodicità di  $90^\circ$ , come aspettato



## Texture: Filter Banks

- Risultati più significativi possono essere ottenuti utilizzando al posto delle semplici basi di Fourier appositi banchi di filtri (Filter Banks) che meglio classificano le varie tipologie di texture:
  - Filtri orientati lungo varie direzioni
  - Filtri multirisoluzione: Laplacian pyramids, Wavelets pyramids
  - Filtri di Gabor (al variare di scala e orientazione).



## Texture: Ulteriori metodi

- Auto-correlation
- Fourier Transform in small windows
- Wavelets
- Feature vectors
- Statistical descriptors
- Markov Chains
- ...



## Texture Synthesis



Perchè fare Sintesi di Textures?

E' proprio bello ;-)



Perchè fare Sintesi di Textures?

- **Compressione**

- Invece di spedire tutta l'immagine si manda il modello e si genera il resto in maniera automatica

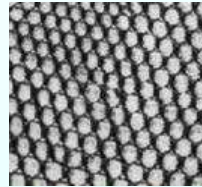
## Perchè fare Sintesi di Textures?

### Perchè fare Sintesi di Textures?

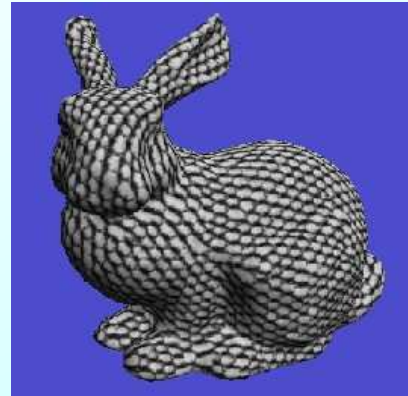
- 3D Rendering



+



=



Greg Turk; "Texture Synthesis on Surfaces"; SIGGRAPH 2001, pp. 347-354.

Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato

## Perchè fare Sintesi di Textures?

- Computer graphics.
- Movies.
- Computer games.

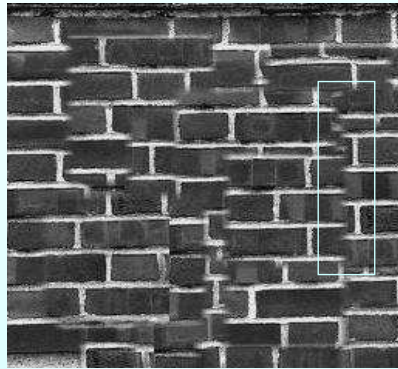


Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato



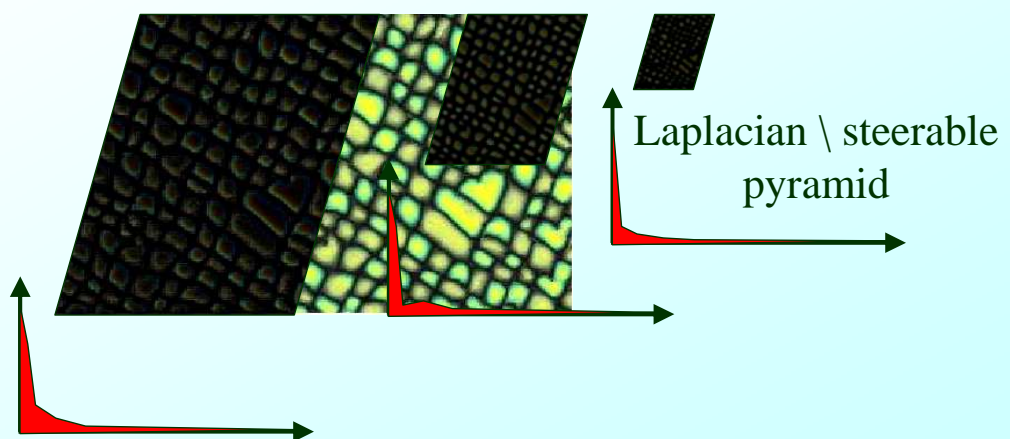
# Why is Texture Synthesis Hard?

- Stationarity: No noticeable boundaries.



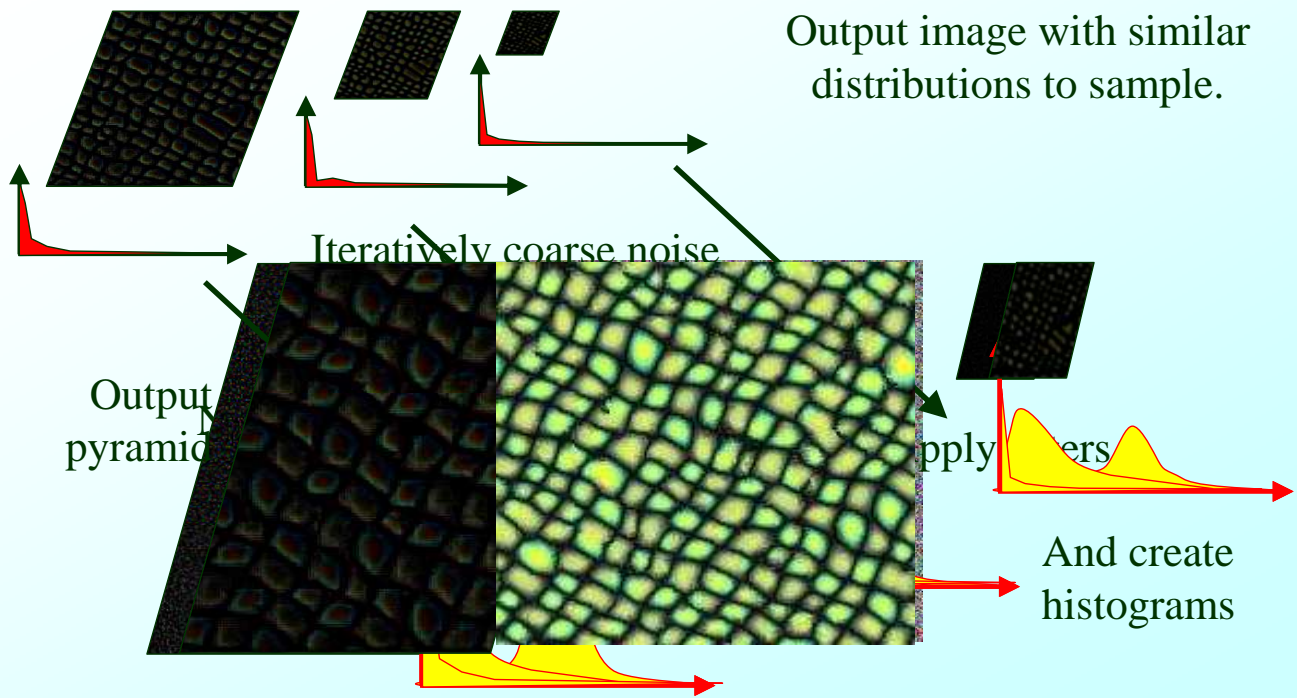
# Heeger & Bergen 95

- Model these distributions as 1<sup>st</sup> order statistics – histograms.



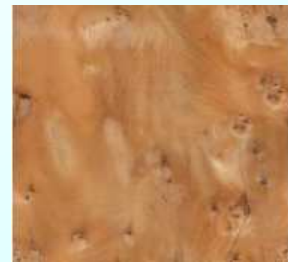
\* D.J. Heeger, J.R.Bergen; "Pyramid-based texture analysis/synthesis"; SIGGRAPH'95.

# Using Histograms for Synthesis



# Some Results

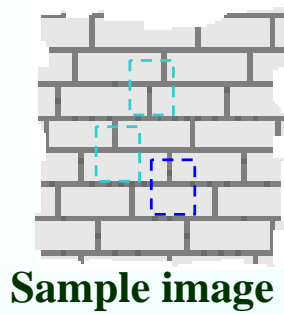
Original



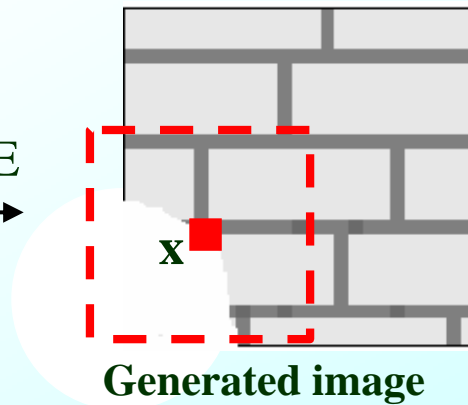
Output



# Texture Synthesis

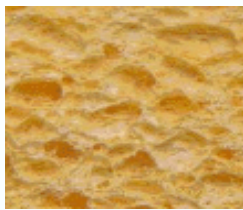


SAMPLE  
→



$$P(x | \text{neighborhood of pixels around } x)$$

## Efros & Leung 99 - Algorithm

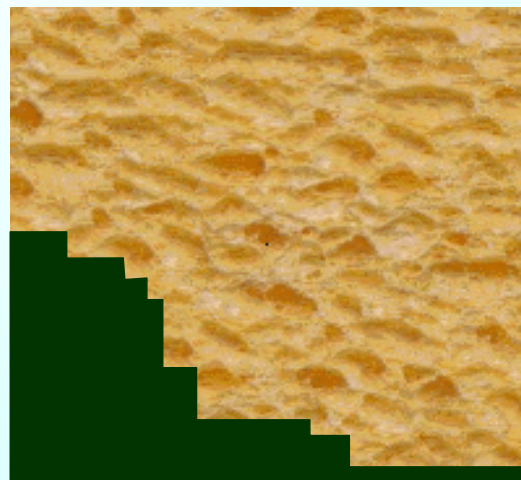


Compare samples using  
Gaussian weighted

$SSD(\text{blue square}, \text{red square})$

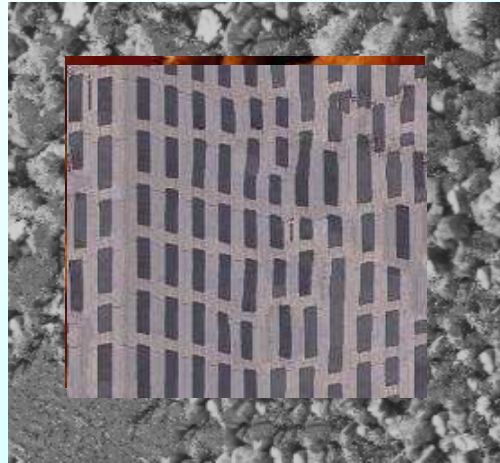
(using only known values).

Select random value from best matching samples.



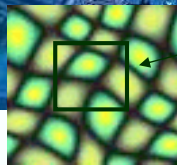
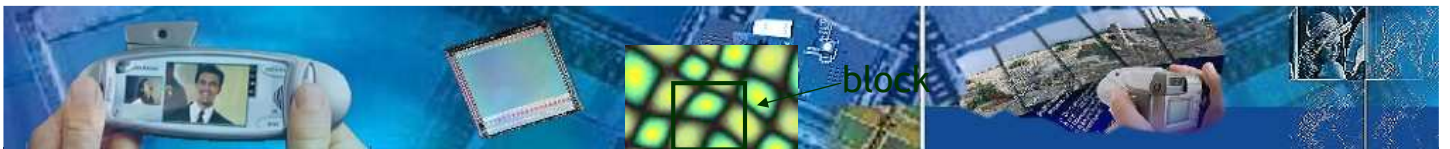


## Issues of Pixel-by-Pixel Synthesis

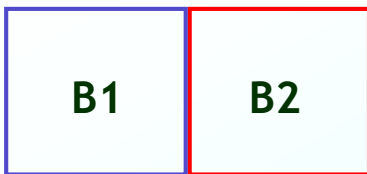


**Non planar structures**  
**Non planar structures**

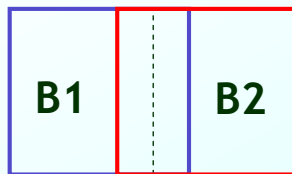
B. A. A. Wei, M. Levoy; "Texture synthesis on non-planar surfaces sampled by a camera";  
 SIGGRAPH00  
 Computer Vision A.A. 2008/2009 – Prof. Sebastiano Battiato



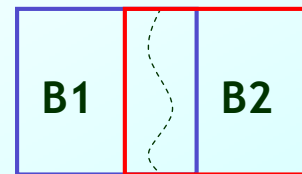
Input texture



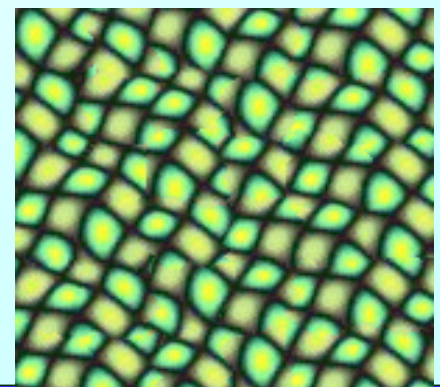
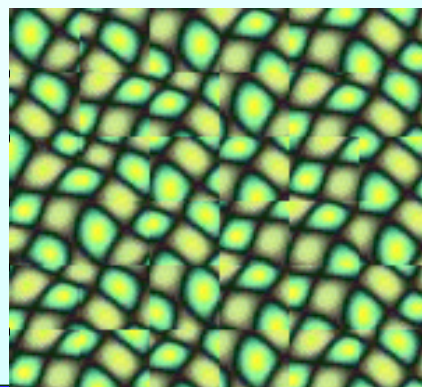
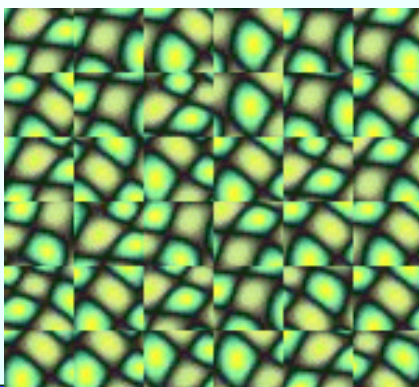
Random placement  
of blocks



Neighboring blocks  
constrained by overlap



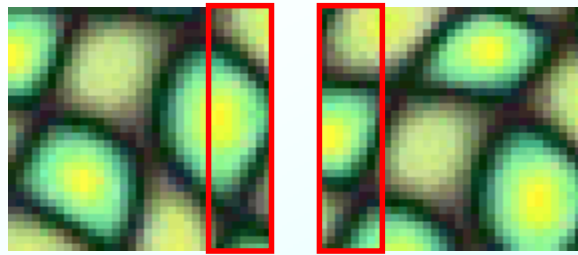
Minimal error  
boundary cut



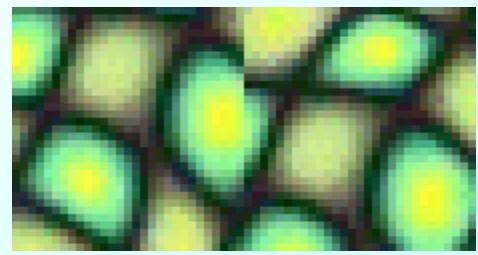


# Minimal Error Boundary

overlapping blocks

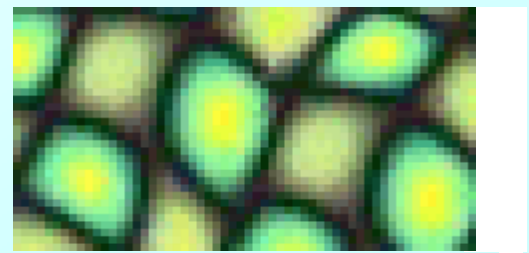


vertical boundary



$$\left[ \begin{array}{c} \text{block 1} \\ - \\ \text{block 2} \end{array} \right]^2 = \text{error map}$$

The diagram shows two vertical grayscale blocks being subtracted from each other. The result is a grayscale error map where a red line highlights the boundary between the two blocks.



overlap error

min. error boundary