



3-ΔΙΑΣΤΑΤΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ για ΡΟΟΜΕΤΡΑ ΕΤΕΡΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ

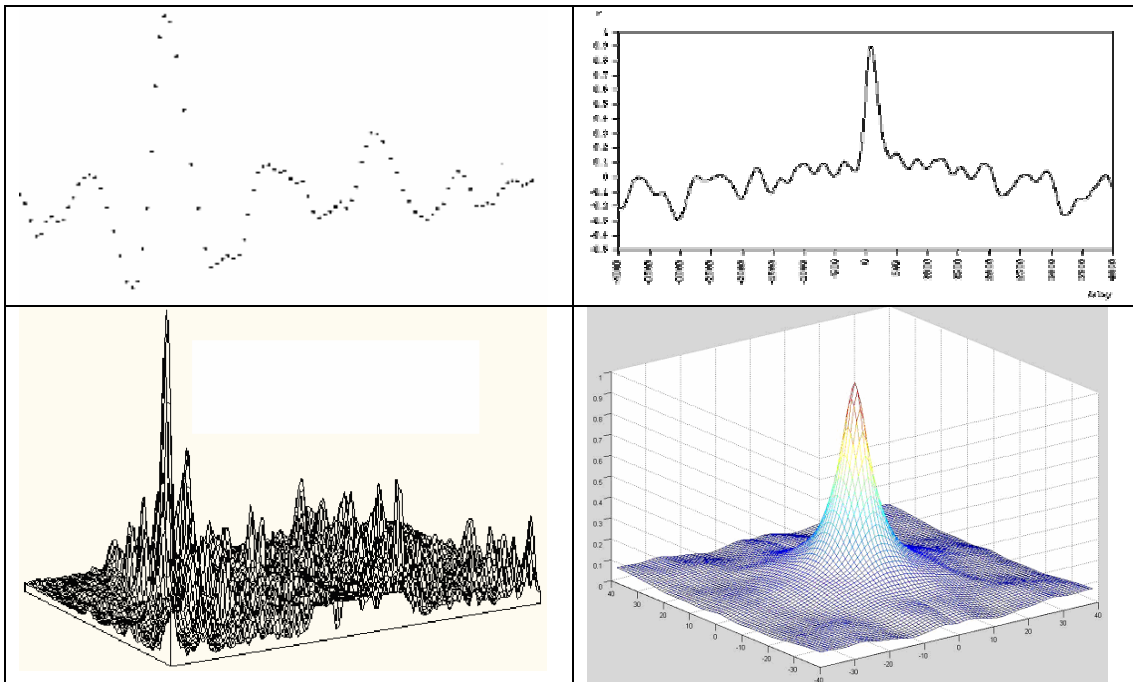
Βέντζας Δ. (SMISA)

Καθηγητής Μετρήσεων & ΣΑΕ – Εργαστήριο Σημάτων και Συστημάτων
ΤΕΙ Λάρισας – Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών

Λέξεις Κλειδιά: Αλληλοσυσχέτιση, μετρητής ροής, 3-διαστατα εργαλεία.

Περίληψη: Η εργασία παρουσιάζει σύγχρονες εξελίξεις στην έρευνα μετρητών ροής με αλληλοσυσχέτιση, λόγω των εξελίξεων τόσο στον τομέα της επεξεργασίας σήματος όσο και στην κατανόηση των καθεστώτων ροής, με αποτέλεσμα καλύτερη επαναληπτικότητα της αλληλοσυσχέτισης. Αναπτύσσουμε, εφαρμόζουμε, χρησιμοποιούμε και ελέγχουμε 2& 3-διάστατα εργαλεία για τον σχεδιασμό, ανάπτυξη και έλεγχο ροομέτρων αλληλοσυσχέτισης. Οι αλληλοσυσχετίσεις στο χώρο-χρόνο συνάγονται από αποσβενύμενα ίχνη με ανεξάρτητες και τυχαίες εξετάσεις. Ο χρόνος μετάβασης της αλληλοσυσχέτισης εξαρτάται από την δομή και τις ιδιότητες ροής των ιχνών, και την απόσταση και ιδιότητες φίλτρων των αισθητήρων στο χώρο-χρόνο. Ο αλγόριθμος αυτοσυσχέτισης (auto-correlation), αλληλοσυσχέτισης (ετεροσυσχέτισης, cross-correlation) είναι, βλ. σχ. 1:

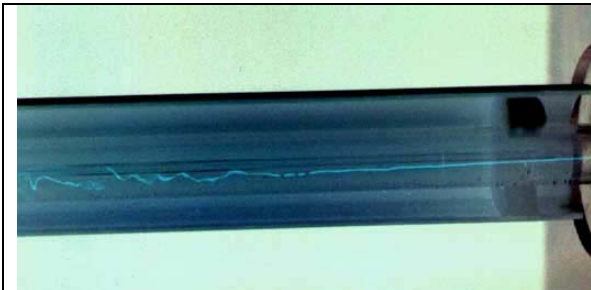
$$R_{XY}(t, t + \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau)dt \quad R_{YX}(t, t + \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T y(t)x(t+\tau)dt = R_{XY}(\tau) = R_{YX}(\tau) = E[X]E[Y]$$



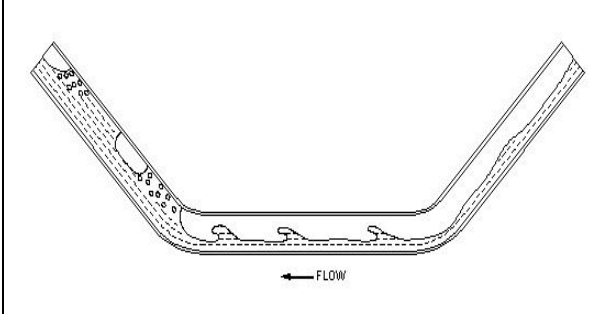
Σχ. 1. Τυπικές ετεροσυσχετίσεις

Η έρευνα στα ροόμετρα ετεροσυσχέτισης έρχεται από τη δεκαετία του '80 και υπάρχει πεδίο για περαιτέρω έρευνα βασισμένη σε βελτιωμένο dsp hardware και software. Το καθεστώς της ροής καθώς και η παρακολουθούμενη και συσχετιζόμενη ιδιότητα του ρευστού παίζει σημαντικό ρόλο στην επαναληπτικότητα της

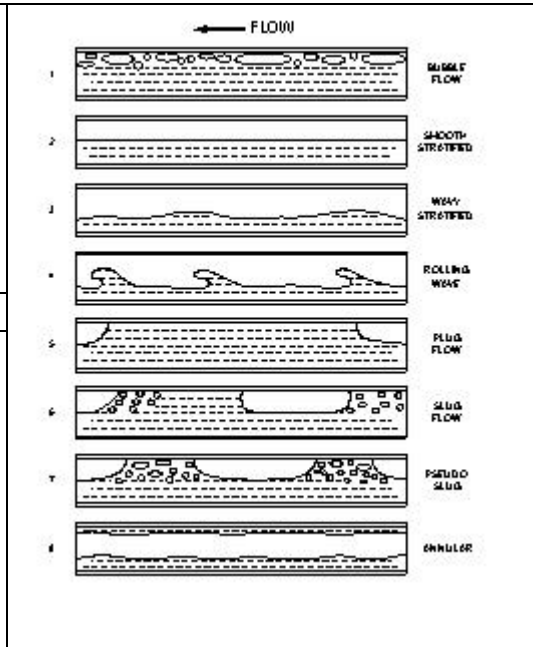
αλληλοσυσχέτισης, Το καθεστώς ροής εξαρτάται από την γεωμετρία του σωλήνα, το ρευστό και τις συνθήκες ροής και χαρακτηρίζεται από την εκροή, την συχνότητα εκροής, την διάρκεια, την μεταβολή ης ροής, κ.λ.π. Μέρος της έρευνας είναι η ανάπτυξη τρισδιάστατων software εργαλείων αλληλοσυσχέτισης με έμφαση στην τρισδιάστατη συνέλιξη σε ρόμετρα ετεροσυσχέτισης. Η 3D προσέγγιση εμπνέεται από την οπτική.



Σχ. 2. Χαρακτηριστικό ίχνος σε ροή



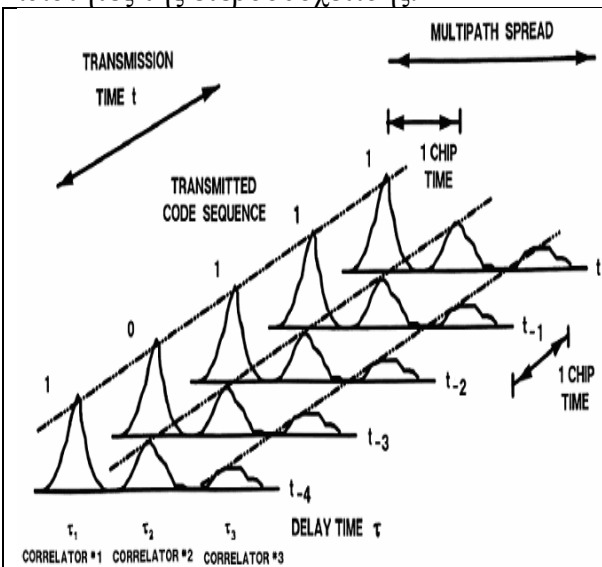
Σχ. 3. Μεταβολή καθεστώτος ροής



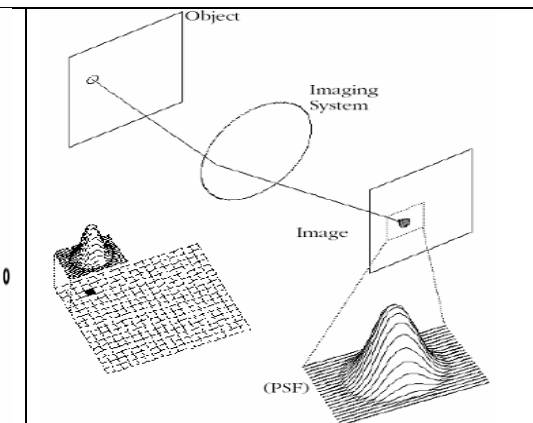
Σχ. 4. Καθεστώτα πολυφασικής ροής

Η αυτοσυσχέτιση αναδεικνύει και ξεχωρίζει τα σήματα από το θόρυβο και μεταξύ τους, καλύτερα από το απλό πεδίο του χρόνου, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση τυχαίου θορύβου και σήματος.

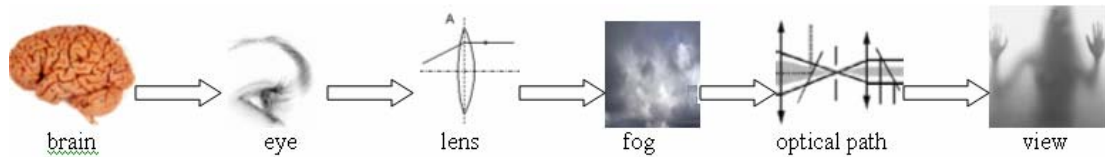
Για τον έλεγχο των διδιάστατων σημάτων και του αποτελέσματος (ετεροσυσχέτισης) χρησιμοποιούνται οι ιδιότητες της ετεροσυσχέτισης συγκεκριμένων σημάτων (τυχαίου και ψευδοτυχαίου σήματος, και οι γενικές ιδιότητες της ετεροσυσχέτισης.



Σχ. 5. Πολυκάναλη ετεροσυσχέτιση



Σχ. 6. Συνελκτική οπτική αλυσίδα. Στην οπτική το παρατηρούμενο αντικείμενο συνελίσσεται με τον φακό και την PSF του συστήματος μέτρησης



Σχ. 7. Συνελικτική αλυσίδα σε οπτικό σύστημα

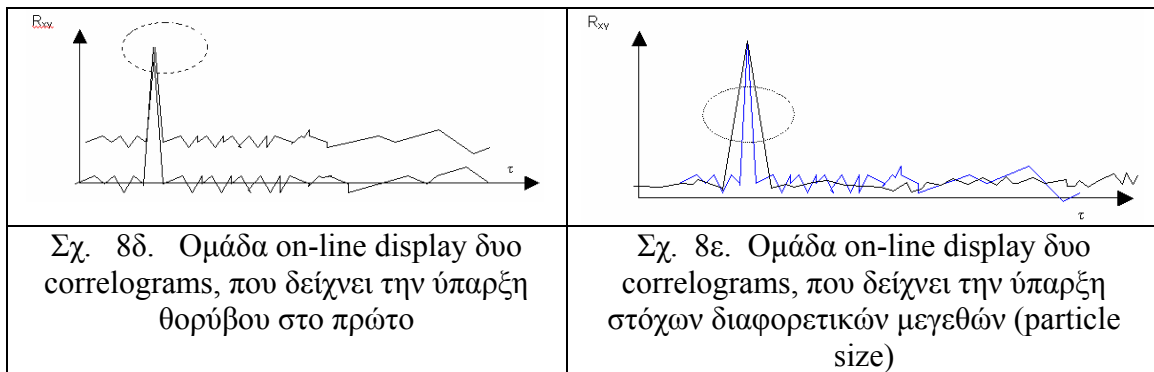
Ανάλυση σφαλμάτων: Τα συστηματικά σφάλματα στη μέτρηση ταχύτητας με ετεροσυσχέτιση, οφείλονται στα μη παγωμένα (μεταβλητά) ίχνη με ανεξάρτητες και τυχαίες ταχύτητες. Η ετεροσυσχέτιση εξαρτάται από τη δομή του ίχνους, που με την σειρά του εξαρτάται από την διεργασία της ροής και την παρακολουθούμενη ιδιότητα-ες, την απόσταση των δύο αισθητήρων και το φιλτράρισμα σε χωρο-χρόνο από τους αισθητήρες και τα ηλεκτρονικά τους.

Θεωρείστε μία μεταβαλλόμενη ιδιότητα (tracer), π.χ. θερμοκρασία, δείκτη διάθλασης κ.λ.π., που αποδίδεται σαν σήμα μέσω ενός αισθητήρα σαν $\theta(x, t)$ στο χώρο-χρόνο. Για διδιάστατη εικόνα, οι ιδιότητες της διεργασίας αποδίδονται με διαφορετικά χρώματα και εντάσεις του γκρι ή με μορφολογικά χαρακτηριστικά της εικόνας. Για μη παγωμένο ίχνος (non-frozen pattern) μεταβαλλόμενης ιδιότητας έχουμε $\theta(x, t) \neq \theta(x-v.T, t-T)$ ενώ η ετεροσυσχέτιση έντασης της ιδιότητας στο χώρο-χρόνο είναι:

$$R_{\theta}(L, \tau) \neq R_{\theta}(L-v.\tau, 0) \neq R_{\theta}(0, \tau-L/v) \quad (1.1)$$

(η ισότητα ισχύει για παγωμένα ίχνη). Κάθε ίχνος ταξιδεύει με μέση ταχύτητα v και μία ανεξάρτητη, πρόσθετη και περιορισμένου φάσματος (band limited) Gaussian διαταραχή (θόρυβος).

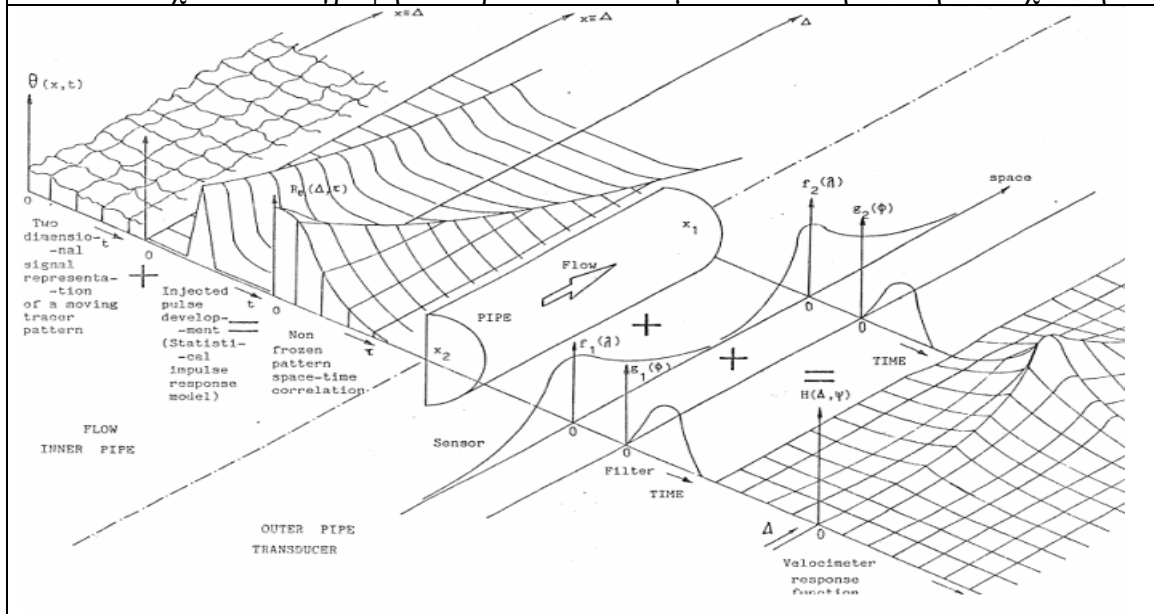
<p>Σχ. 8α. Ομάδα on-line display «ταυτόχρονων» correlograms, που δείχνει την αυξητική μεταβολή της κορυφής (αλλαγή ταχύτητας, ροής, κ.λ.π.)</p>	<p>Σχ. 8β. Ομάδα on-line display «ταυτόχρονων» correlograms, που δείχνει την αυξητική μεταβολή της κορυφής (αλλαγή ταχύτητας, ροής, κ.λ.π.) με ταυτόχρονη απόσβεση της πληροφορίας λόγω θορύβου</p>
<p>Σχ. 8γ. Ομάδα on-line display δυο «ταυτόχρονων» correlograms, που δείχνει την ύπαρξη δυο (ή περισσότερων) στόχων (ταχύτητα δυο αεροπλάνων, διφασική ροή, κ.λ.π.) με ταυτόχρονη απόσβεση της μίας σε σχέση με την άλλη λόγω θορύβου</p>	



Σχ. 8δ. Ομάδα on-line display δυο correlograms, που δείχνει την ύπαρξη θορύβου στο πρώτο

Σχ. 8ε. Ομάδα on-line display δυο correlograms, που δείχνει την ύπαρξη στόχων διαφορετικών μεγεθών (particle size)

Σχ. 8. Καταγραφή Μεταβατικών Φαινομένων από την Αλληλοσυσχέτιση



Σχ. 9. Απόκριση συχνότητας σε χώρο και χρόνο (velocimeter space-time response function). Το σφάλμα φάσης είναι $\varepsilon_d^2 \propto k \cdot |\tau_{downstream} - \tau_{upstream}|$, όπου $\kappa=0.15-0.75$ (Gray, Mersch, Boonstopfel)

Απόκριση συχνότητας σε χώρο και χρόνο:

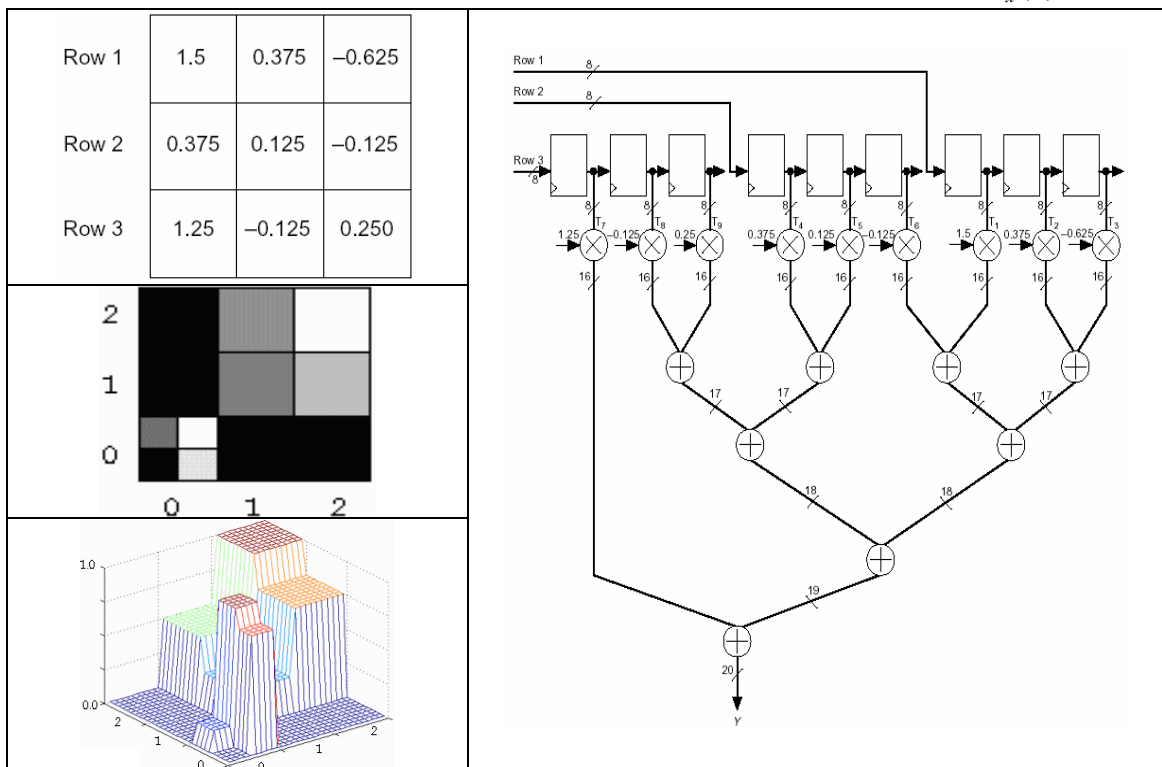
Η συνάρτηση απόκρισης στο χώρο-χρόνο αποκαλύπτει συστηματικά σφάλματα. Η χωρική αλληλοσυσχέτιση $R_\theta(L, \tau)$ «ανοίγει» καθώς τα τ ή L αυξάνονται. Ο μετρητής ροής αλληλοσυσχέτισης αποτελείται από αισθητήρες και μετατροπείς (ηλεκτρονικούς ενισχυτές, φίλτρα). Οι αισθητήρες (σε ζεύγη) έχουν χωρικές αποκρίσεις $f_1(\lambda)$, $f_2(\lambda)$, ενώ τα φίλτρα χρονικές κρουστικές αποκρίσεις $g_1(\theta)$, $g_2(\theta)$. Αυτή η ανάλυση δίνει αλληλοσυσχέτιση που είναι συνέλιξη διδιάστατων συναρτήσεων. Δίνεται η συσχέτιση στο χώρο-χρόνο, που περιγράφει την μεταφορά ιχνών και μάζας. Για ασύμμετρη συνάρτηση αισθητήρα, ο χρόνος μετάβασης, το μέγιστο της αλληλοσυσχέτισης, εισάγει συστηματικά σφάλματα. Αισθητήρες με περιορισμούς στην χωρική διακριτική ικανότητα και πεπερασμένους χρόνους απόκρισης εισάγουν πρόσθετα σφάλματα. Η πολύπλοκη αλληλεπίδραση ιχνών και μετρητή ροής εισάγουν συστηματικά σφάλματα στα ροόμετρα αλληλοσυσχέτισης. Αταίριαστη απόκριση κέρδους-φάσης των μετατροπέων παραμορφώνει την αλληλοσυσχέτιση, άρα και μετατοπίζει την κορυφή.

Η αλληλοσυσχέτιση τελικά είναι η συνέλιξη μιας αλληλουχίας εμπλεκόμενων συναρτήσεων μεταφοράς (convolution) που είναι και αυτές διδιάστατες. Οποιαδήποτε ασυμμετρία σ' αυτές τις συναρτήσεις μεταφοράς εισάγει συστηματικό σφάλμα. Το συνολικό σφάλμα της μετρούμενης (apparent) ταχύτητας αυξάνει ποσοστιαία καθώς

μειώνεται η απόσταση των αισθητήρων (δύο για την ετεροσυσχέτιση), άρα καθώς μειώνεται και ο χρόνος μετάβασης (transit time).

Συστηματικά σφάλματα μέχρι 10% και 20 % είναι πιθανά σε μη διακριβωμένους και ισοσταθμισμένους αισθητήρες, προενισχυτές, φίλτρα ενισχυτές, και μονάδα επεξεργασίας. Σφάλματα ακόμη και 10 % μπορούν να συμβούν ακόμη και μετά από διακρίβωση, ισοστάθμιση λόγω μεταβολών στην διεργασία, π.χ. αλλοίωση του «παγωμένου» ίχνους (tracer pattern). Οι πραγματικοί αισθητήρες έχουν περιορισμένη χωρική ικανότητα και πεπερασμένη απόκριση συχνότητας και χρόνους απόκρισης και εισάγουν πρόσθετα σφάλματα. Οι πολύπλοκη συνελκτική αλληλεπίδραση μεταξύ σημάτων και της μετρητικής διάταξης (velocimeter) εισάγει συστηματικά σφάλματα που περιορίζουν την πρακτική εφαρμογή των ροομέτρων τύπου ετεροσυσχέτισης (Fell, 1982). Ακατάλληλα κέρδη, φάσεις και αποκρίσεις συχνότητας στα ηλεκτρονικά των αισθητήρων προκαλούν παραμόρφωση της τελικής ετεροσυσχέτισης (correlogram) και μετατοπίζουν την κορυφή και την συναγόμενη από αυτή πληροφορία. Για κατανομή σήματος Gaussian ο Boonstoppel πρότεινε μεταβλητότητα της ετεροσυσχέτισης (correlation variance):

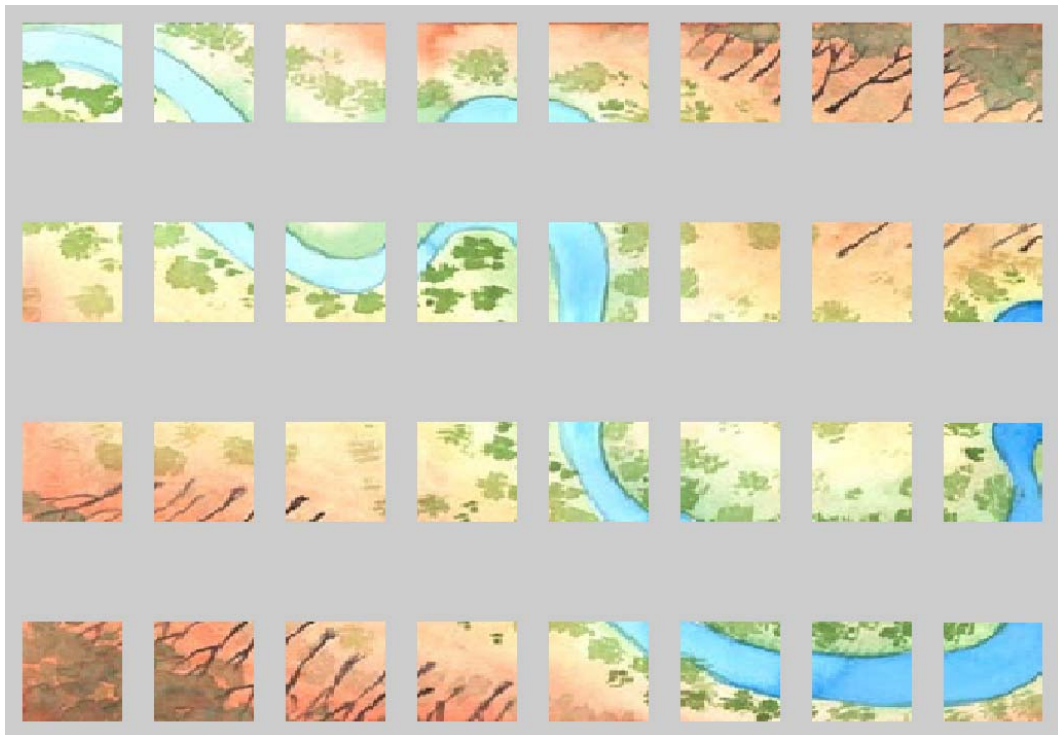
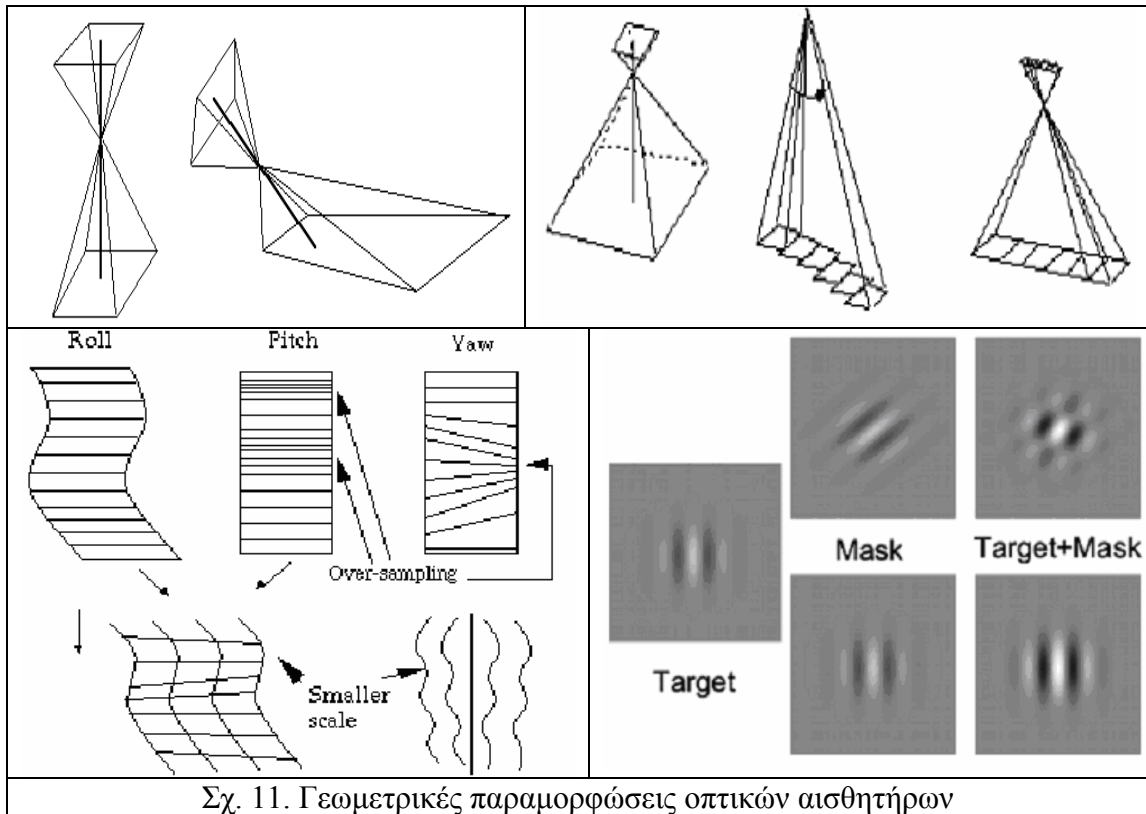
$$\frac{0.137}{B^3 \cdot T} \cdot \frac{R_n(0)}{R_x(0)}$$



Σχ. 10. Μάσκα, ίχνος, μοντέλο ίχνους και υλοποίηση ετεροσυσχετιστή. Ο πολλαπλασιασμός pixel X pixel $Q(i, j) = P_1(i, j) \times P_2(i, j)$ γίνεται στο πεδίο συχνοτήτων με ευθύ και ανάστροφο μετασχηματισμό Fourier και μάσκα. Η αριθμητική της εικόνας πρέπει να περιορισθεί να ξεφύγει εκτός ορίων (out of range) με κάποιο συντελεστή (scaling factor), καθώς και ο κβαντισμός της εικόνας (truncated, wrap around). Απλοί τελεστές όπως ο AND επιταχύνουν τις πράξεις. Rgb πολλαπλασιασμοί είναι δυνατοί.

Για οπτικούς αισθητήρες οι παράγοντες που επηρεάζουν την γεωμετρία της εικόνας roll, pitch, yaw, βλ. σχ. 11. Οι τεχνικές κεντρικής φωτογράφισης, σάρωσης και ώθησης δίνουν διαφορετικές γεωμετρικές παραμορφώσεις (geometrical distortion).

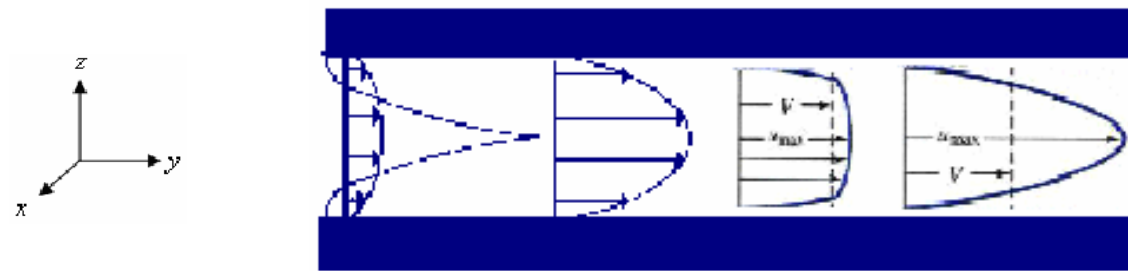
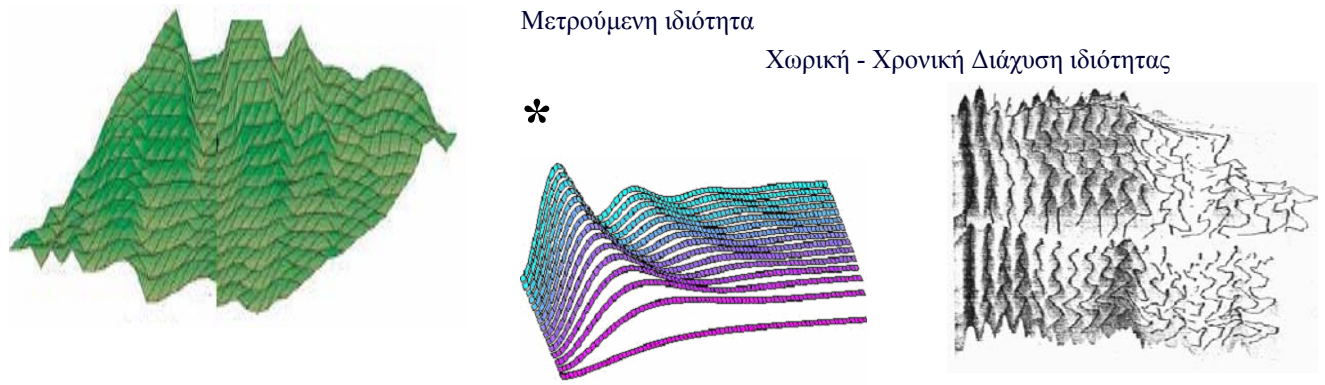
Ανεξάρτητα από τον αισθητήρα υπάρχει και η διαταραχή της διεργασίας, π.χ. υδάτινος όγκος σε κανάλι, ποτάμι (rotation, drift, κ.λ.π.).



```
>> im = imread('river1.bmp');
>> seg = imseg(im,64,1)
```

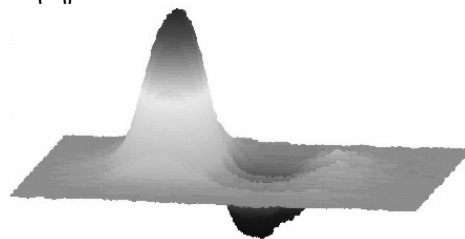
```
n=32; a=rand(n); imagesc(a); colormap(gray); b=inv(a); imagesc(b)
a=rand(32); b=inv(a); figure(1), imagesc(a), colormap(gray); axis square
figure(2), imagesc(b), colormap(gray); axis square
figure(3), imagesc(cov(a)), colormap(gray); axis square
figure(4), imagesc(cov(b)), colormap(gray); axis square
```

Σχ. 12. Τμηματοποίηση (κατατεμαχισμός) εικόνας και επίδραση στην ετεροσυσχέτιση

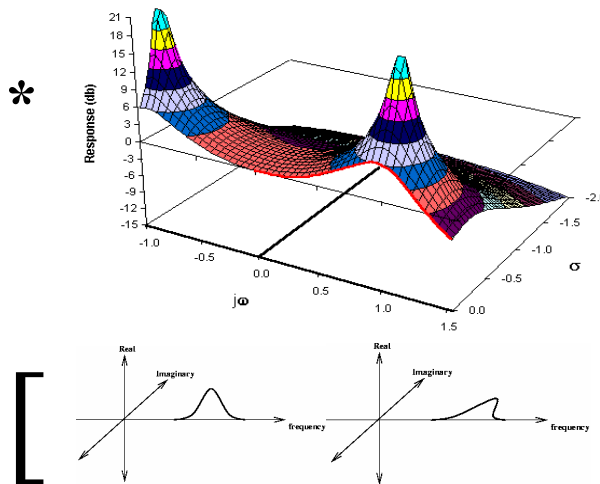


Χωρο - χρονική ευαισθησία αισθητήρων

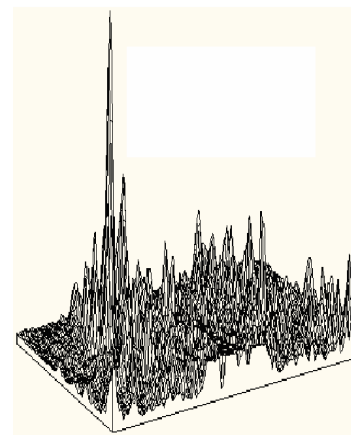
*



Χωρο - χρονική ευαισθησία ηλεκτρονικών



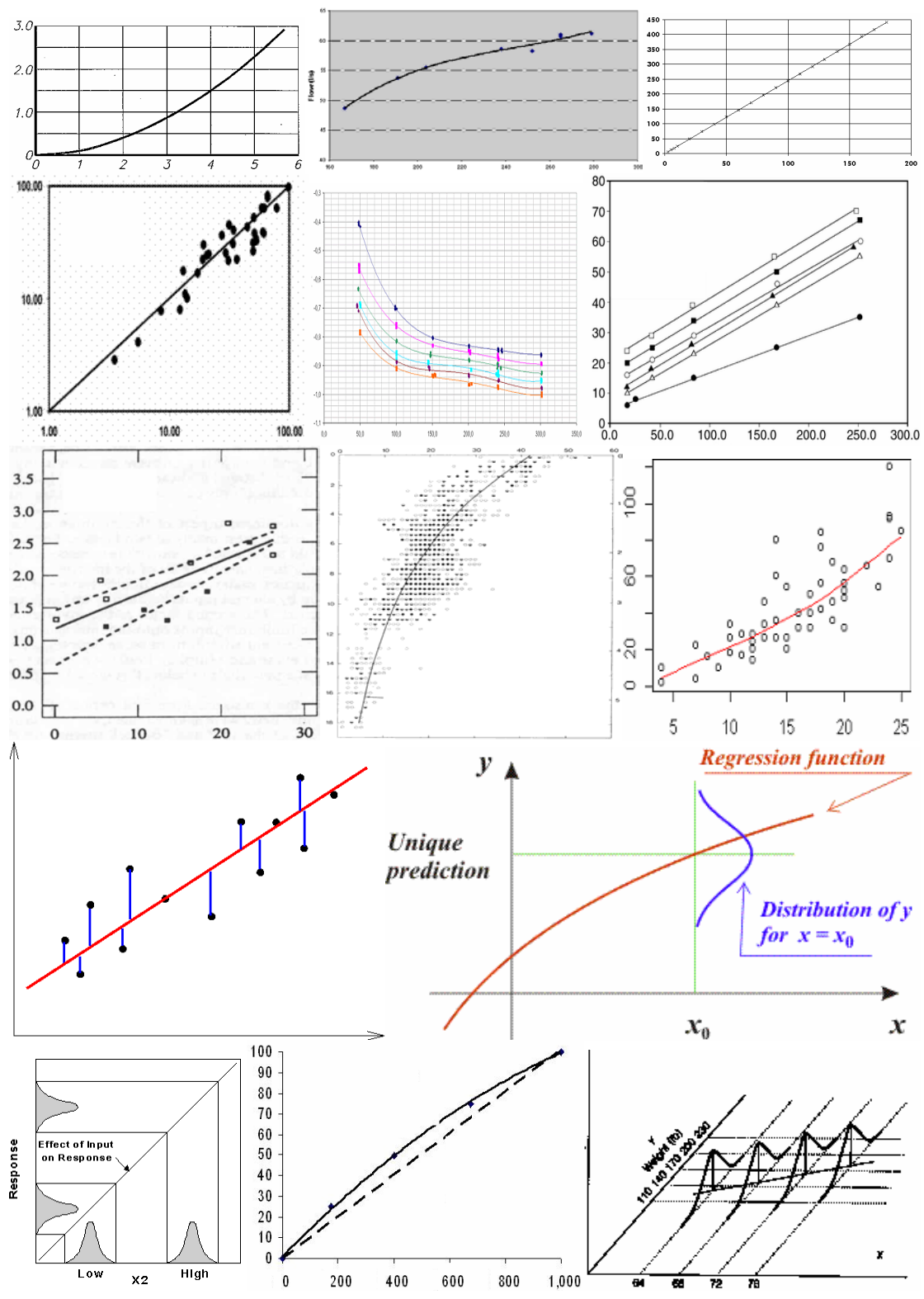
Ετεροσυσχέτιση



Σχ. 13. Καθεστώτα ροής και το πρόβλημα της συνέλιξης σφαλμάτων στην αλυσίδα της αλληλοσυσχέτισης

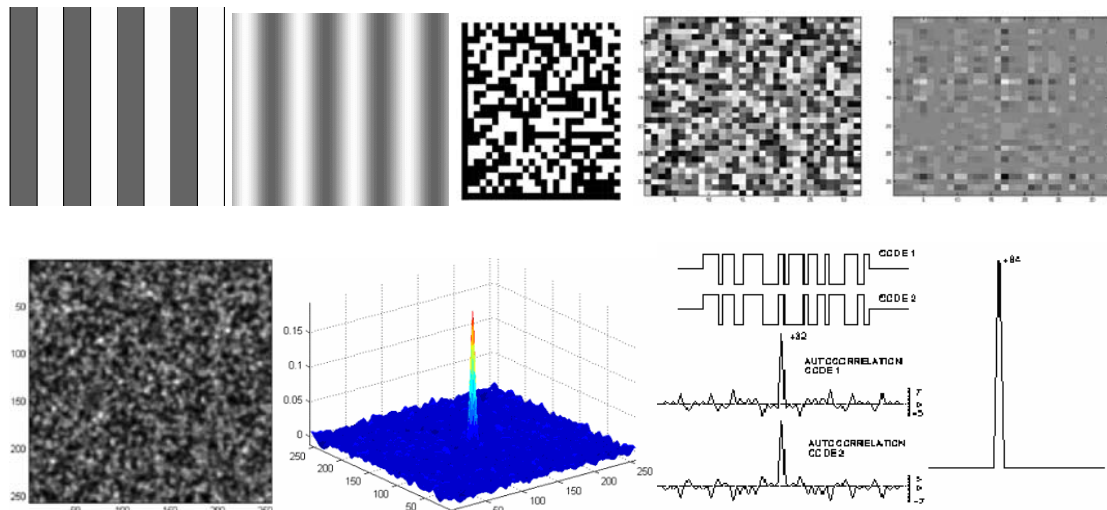
Σαν (φασματική, χωρική και χρονική) διακριτική ικανότητα ενός αισθητήρα καθορίζεται η ελάχιστη διάκριση (βήμα) της μέτρησης. Η (φασματική, χωρική και χρονική) συχνότητα δειγματοληψίας επηρεάζει το aliasing και την μορφή και ακρίβεια του σήματος και της ετεροσυσχέτισης. Συνδυασμοί διακριτικών ικανοτήτων

και συχνοτήτων δειγματοληψίας μεταβάλλουν την αντίληψή μας για το σήμα υπό συσχέτιση, άρα και το αποτέλεσμα της μέτρησης (δηλ. την ετεροσυσχέτιση). Η μελέτη μας προσπαθεί να αναδείξει τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ακρίβεια της μέτρησης με την μέθοδο της ετεροσυσχέτισης.



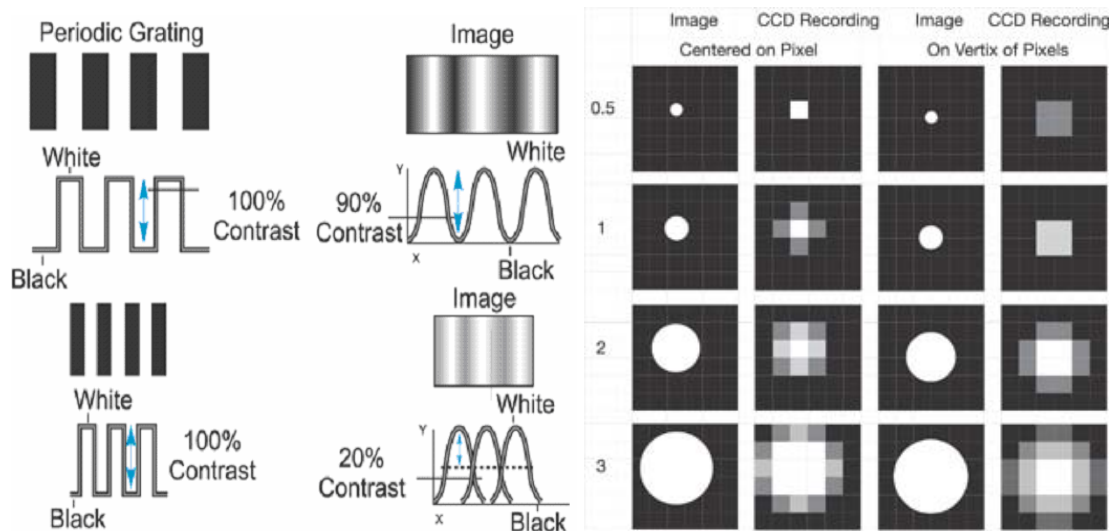
Σχ. 14. Μελέτη επίδρασης συνθηκών ροής, και μετρητικής διάταξης της αλληλοσυσχέτισης στην καμπύλη διακρίβωσης και μορφές καμπυλών διακρίβωσης

Η μελέτη τυχαίων, ημιτονοειδών, τετραγωνικών, κ.λ.π. σημάτων, εικόνων με / χωρίς θόρυβο δίνει σαν αποτέλεσμα την αυτό-ετερο συσχέτιση τους υπό γνωστές μαθηματικές ιδιότητες. Το εύρος της αυτοσυσχέτισης ή της ετεροσυσχέτισης σημάτων και εικόνων συσχετίζεται με το σχήμα και μέγεθος των «στόχων». Υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της τυχειότητας, ψευδοτυχειότητας, περιοδικότητας σημάτων. Η ετεροσυσχέτιση έχει εφαρμογές και σε άλλα πεδία της Μηχανικής και των Τηλεπικοινωνιών και η ανάλυση σφάλματος των ροομέτρων τύπου ετεροσυσχέτισης ισχύει και εκεί.



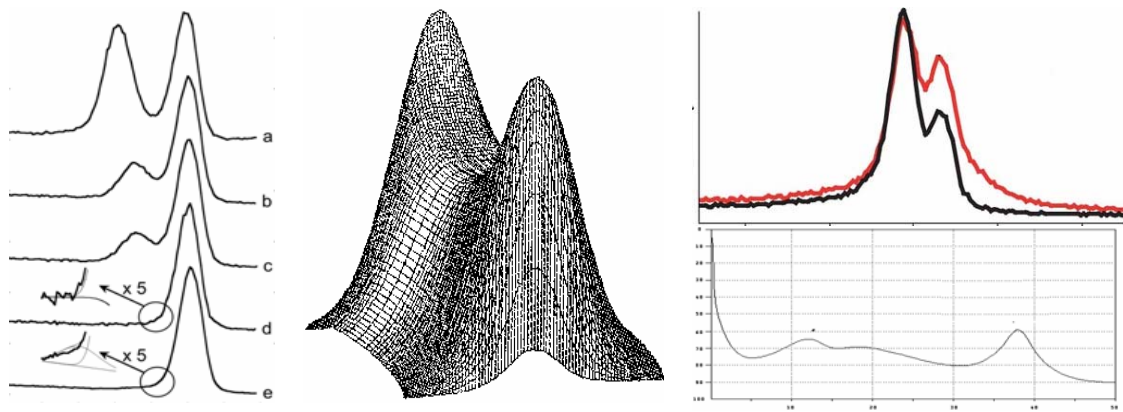
Διπλοί κώδικες

Σχ. 15. 2-D τετραγωνικό σήμα, 2-D ημιτονοειδές σήμα, 2D barcode, τυχαίο (με το αρνητικό του) και ψευδοτυχαίο σήμα εικόνας και διπλοί κώδικες

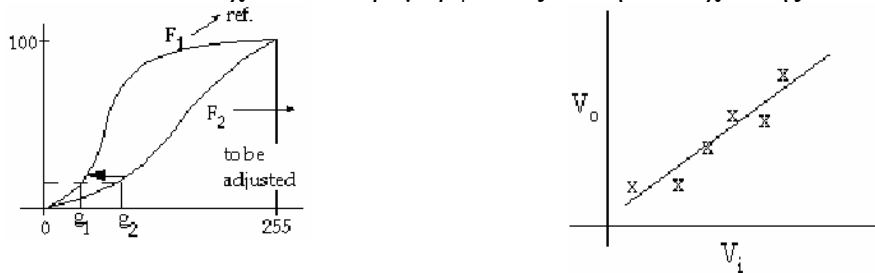


Σχ. 16. Χωρική διακριτική ικανότητα ετεροσυσχέτισης σε επίπεδο pixel (Spatial Resolution)

Η έρευνά μας ασχολείται με την ετεροσυσχέτιση σε φανταστικό περιβάλλον (virtual cross-correlation velocimeter), με θέματα όπως: η επίδραση στις καμπύλες διακρίβωσης των συνθηκών σχεδίασης της ετεροσυσχέτισης σε φανταστικό περιβάλλον, η επίδραση του ψαλιδισμού στην αυτοσυσχέτιση και η επίδραση των παραθύρων στην αυτοσυσχέτιση;



Σχ. 17. Παραμορφώσεις Αλληλοσυσχέτισης



Σχ. 18. Ισοστάθμιση των αισθητήρων της ετεροσυσχέτισης (Detector Response Calibration). Η ευαισθησία (sensitivity) των αισθητήρων (ανά ζεύγη, λόγω της φύσης της αλληλοσυσχέτισης) διακρίνεται από την διακριτική ικανότητα (resolution), την χωρική (γεωμετρική) αξιοπιστία (geometric reliability), κ.λ.π. Η ισοστάθμιση των αισθητήρων (ανά ζεύγη) γίνεται με αναφορά στην αθροιστική κατανομή των σημάτων (καμπύλες F2 σε σχέση με τον αισθητήρα αναφοράς F1).



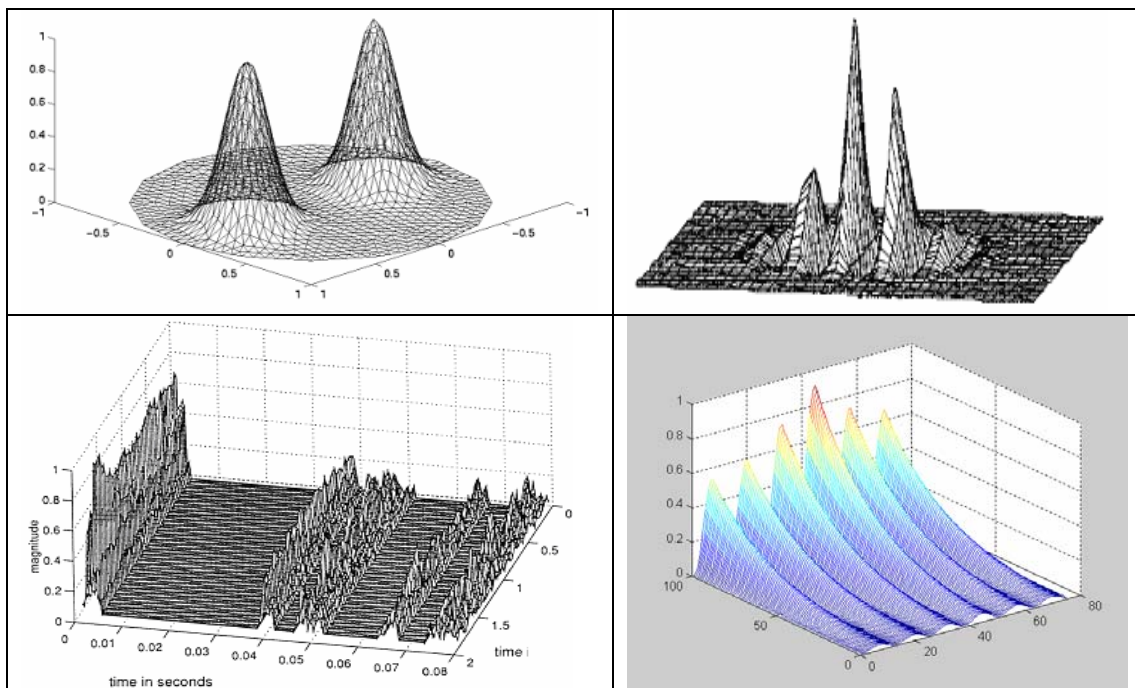
Σχ. 19. Αισθητήρες (χωρητικός, θερμοζεύγη, τομογραφίας, κ.λ.π.)

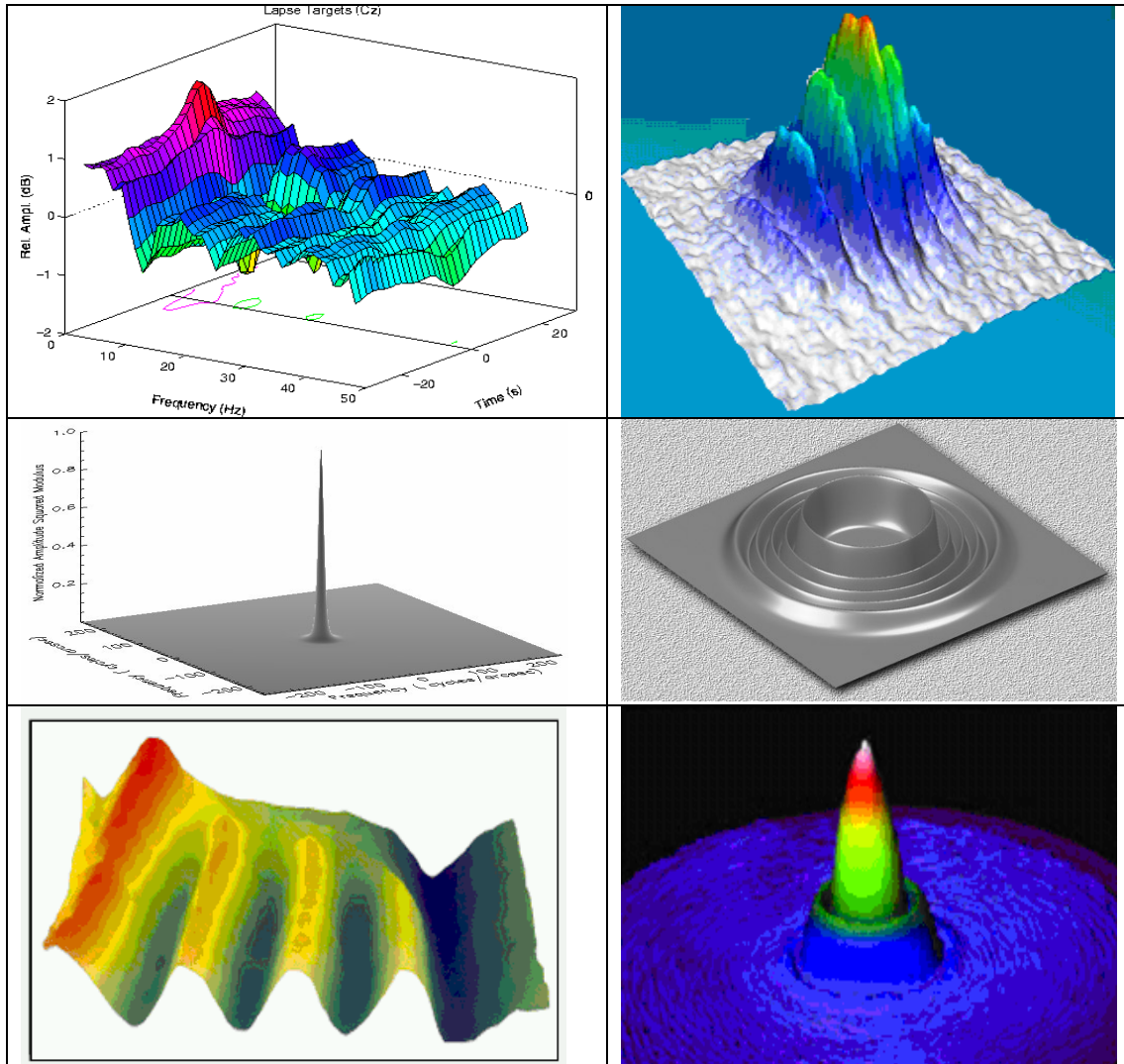
Συμπεράσματα: Σκοπός της έρευνας είναι η ανάπτυξη και ο έλεγχος τρισδιάστατων software εργαλείων αλληλοσυσχέτισης με έμφαση στην τρισδιάστατη συνέλιξη σε ροόμετρα ετεροσυσχέτισης. Η εργασία παρουσίασε βασικά βήματα της έρευνας αυτής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

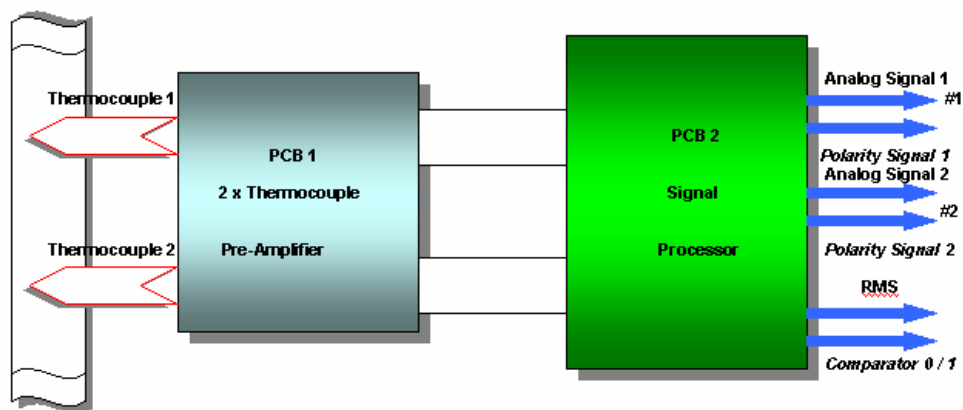
1. Βέντζας Δ, *Επεξεργασία Σήματος*, ΤΕΙ Λάρισας, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Λάρισα 2005
2. Βέντζας Δ, *Επεξεργασία Εικόνας*, e-class ΤΕΙ Λάρισας, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Μεταπτυχιακό στην Πληροφορική, Λάρισα 2007
3. Bovik, A. (Editor), *Handbook of Image and Video Processing*, Academic Press, San Diego, CA, 2000.
4. Campbell, J.B., 1987. *Introduction to Remote Sensing*, The Guilford Press.
5. Castleman, K. R., *Digital Image Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.

6. Dudgeon, D. N. and Mersereau, R. M., *Multidimensional Digital Signal Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
7. Fell, R, Ventzas D. E. *Personal Communications on Cross-Correlation Flowmetering*, UK, 1983
8. Gonzalez, R.C., P. Wintz, 1987. *Digital Image Processing*. 2nd Ed., Addison-Wesley, Reading:MA.
9. Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1992.
10. Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., *Digital Image Processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.
11. Goodman J.W., *Introduction to Fourier Optics*, second ed., McGraw-Hill, NewYork, 1996.
12. Haralick, R. M. and Shapiro, L. G., *Computer and Robot Vision*, Vol. 1, Addison-Wesley, Reading, MA, 1992.
13. Isermann, R., Lachmann, K. H., and Matko, D., 1992, *Adaptive control systems*, Prentice Hall International.
14. Isermann, R, Ventzas D. E. *Personal Communications on Cross-Correlation Flowmetering*, Rhodes, 1985
15. Jain, A. K., *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
16. Lim, J. S., *Two-Dimensional Signal and Image Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.
17. Pratt, W. K., *Digital Image Processing*, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 1991.
18. Proakis, J. G and Manolakis, D. G., *Digital Signal Processing*, 3rd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
19. Schalkoff, R. J., *Digital Image Processing and Computer Vision*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989.
20. Serra, J., *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, New York, 1982.
21. Soille, P., *Morphological Image Analysis*, Springer Verlag, Berlin, 2002.





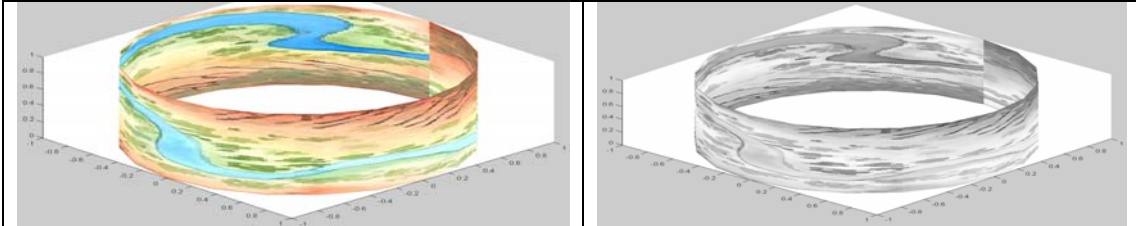
Σχ. 20. Πώς επιδρούν τα σήματα και οι συνθήκες ροής στο σχήμα της ετεροσυσχέτισης και ποια τα συμπεράσματα από το σχήμα της ετεροσυσχέτισης για τα σήματα και τις συνθήκες ροής



Σχ. 21. Θερμικός αισθητήρας συσχέτισης μεταβολής ροής



Δείγματα εικόνων και τεραίν για ετεροσυσχέτιση



```
>> I = imread('river1.bmp');
>> [x,y,z] = cylinder;
>> warp(x,y,z,I);
```

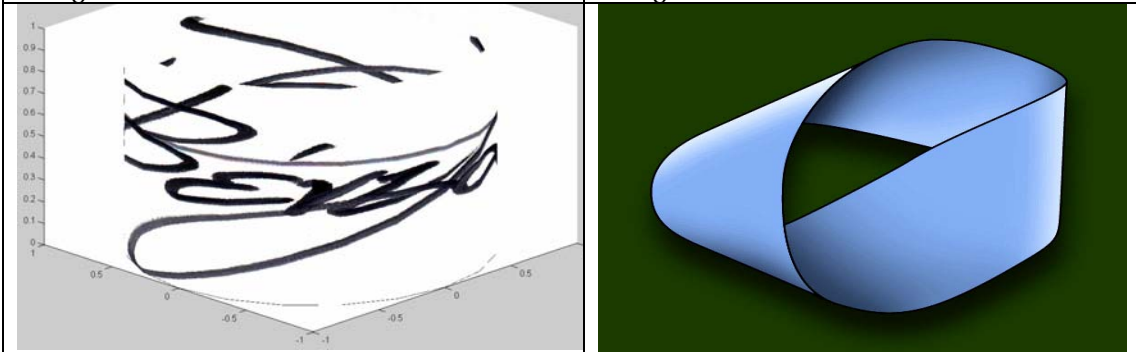
```
>> I1 = rgb2gray(I)
>> [x,y,z] = cylinder;
>> warp(x,y,z,I1);
```

Μία Möbius ταινία-εικόνα κατάλληλη για 2-D αλληλοσυσχέτιση στο χώρο-χρόνο

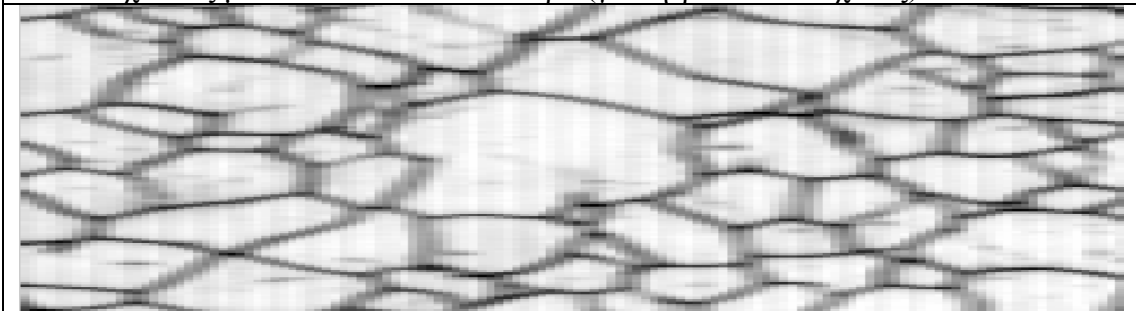


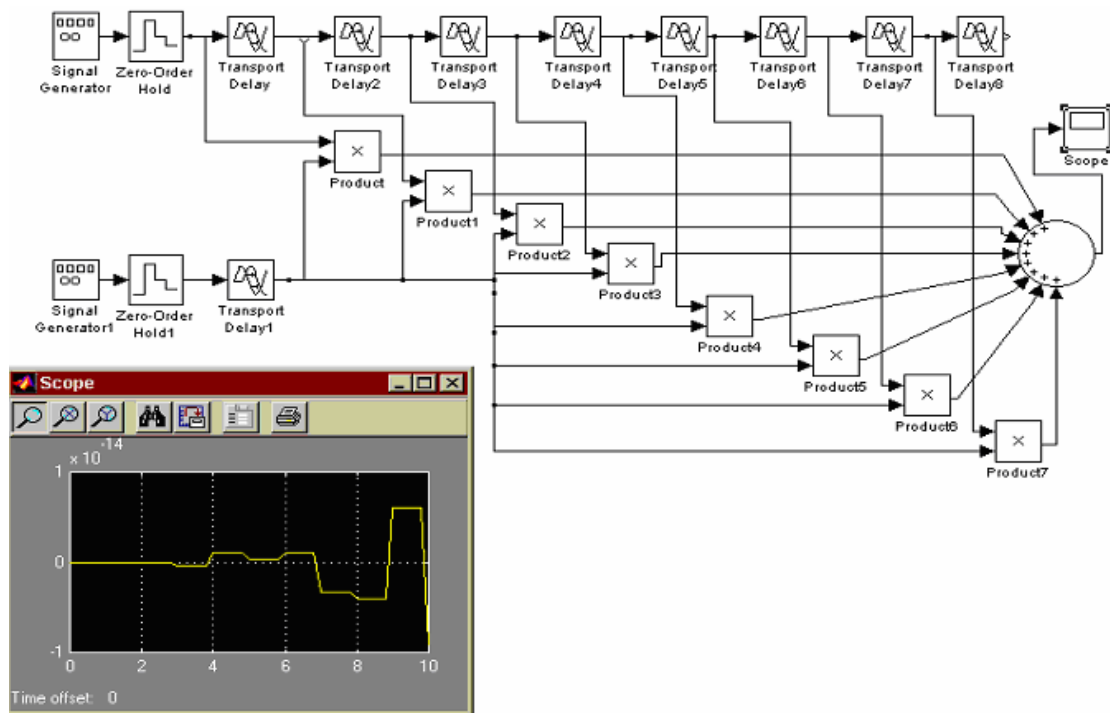
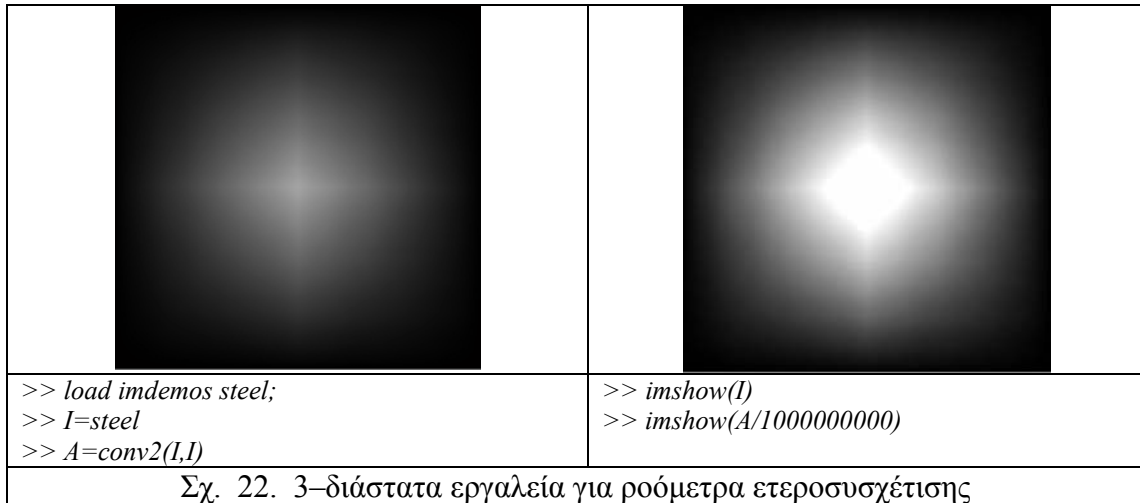
```
>> I = imread('river1.bmp');
>> A=conv2(I,I)
>> imshow(A/50000000000)
>>negative
```

```
>> I1 = rgb2gray(I)
>> A=conv2(I1,I1)
>> imshow(A/100000000000)
>>negative
```

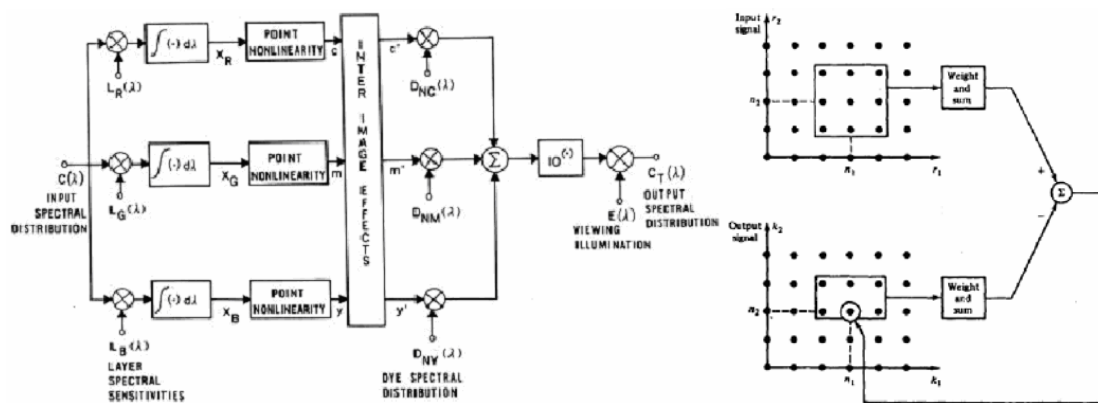


Μία Möbius ταινία είναι μία μονόπλευρη συνεστραμμένη ταινία που μπορεί να έχει μόνον μία εικόνα, π.χ. μία υπογραφή ή ένα τεραίν ή μία ύφανση (texture). Η συνάρτηση warp δίνει texture mapping με παρεμβολή (interpolation) πλέγματος αντιστοιχώντας μία εικόνα σε ένα κύλινδρο (γεννήτρια εικονο-ίχνους)





Σχ. 23α. Τεχνικές υλοποίησης ετεροσυσχετιστών



Σχ. 23β. Τεχνικές υλοποίησης ετεροσυσχετιστών