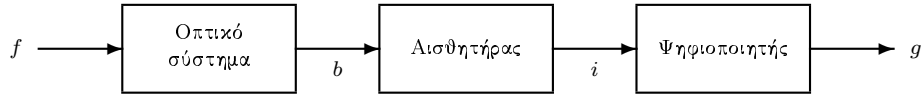


ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΕΙΚΟΝΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εικόνα είναι η αναπαράσταση ενός αντικειμένου που φωτίζεται από μια ακτινοβολούσα πηγή. Επομένως, για την καταγραφή της εικόνας χρειαζόμαστε τη φωτεινή πηγή, το αντικείμενο και το σύστημα καταγραφής. Η φωτεινή πηγή μπορεί να είναι διαφόρων ειδών, π.χ. πηγή λευκού φωτός, πηγή laser, πηγή ακτινοβολίας X, πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας, ακόμα και ακουστική πηγή ή πηγή υπερήχων. Το μόνο το οποίο διαφέρει είναι οι φυσικοί νόμοι που διέπουν το σχηματισμό της εικόνας. Ο μηχανισμός καταγραφής μπορεί να είναι βιολογικός (π.χ. μάτι), φωτοχημικός (π.χ. φιλμ), ή φωτοηλεκτρικός (π.χ. κάμερα τηλεόρασης). Στις επόμενες ενότητες θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο του μηχανισμού καταγραφής που φαίνεται στο σχήμα 3.1.1. Η είσοδος f του μοντέλου είναι η κατανομή φωτεινότητας που ανακλάται από το φωτιζόμενο αντικείμενο. Η φωτεινότητα αυτή περνά από ένα οπτικό σύστημα φακών και μετασχηματίζεται στη φωτεινότητα b . Η φωτεινότητα αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα i (ή ηλεκτρικά φορτία) από τον φωτοηλεκτρικό ανιχνευτή. Τέλος, το ηλεκτρικό ρεύμα μετατρέπεται



Σχήμα 3.1.1: Μοντέλο μηχανισμού καταγραφής εικόνας.

σε διακριτό διδιάστατο ψηφιακό σήμα g από τον ψηφιοποιητή εικόνας. Η ψηφιακή εικόνα g μπορεί να επεξεργασθεί περαιτέρω, να αποθηκευθεί στο δίσκο του υπολογιστή, ή να μεταδοθεί σε ένα άλλο υπολογιστικό σύστημα.

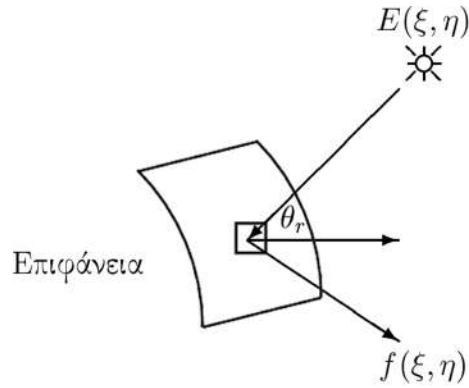
3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ

Το ανθρώπινο μάτι μπορεί να διεγερθεί μόνο από ένα μικρό τμήμα του φωτεινού φάσματος. Το ορατό φως έχει μήκος κύματος λ από 380 nm (υπεριώδες) μέχρι 700 nm (υπέρυθρο). Βεβαίως, υπάρχουν οπτικοί ανιχνευτές που είναι ευαίσθητοι και εκτός της περιοχής αυτής. Οι φωτεινές πηγές μπορούν να είναι μονοχρωματικές ή πολυχρωματικές. Οι πηγές λευκού φωτός εκπέμπουν σε όλο το ορατό φάσμα. Αν και έχουν διαστάσεις, οι πηγές φωτός θεωρούνται σημειακές για λόγους μαθηματικής απλότητας. Κατά την καταγραφή εικόνας, μια πηγή εκπέμπει φωτεινότητα $E(\xi, \eta)$ η οποία ανακλάται στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.1.

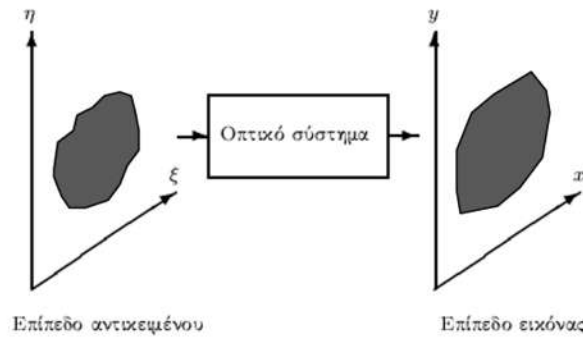
Το ανακλώμενο φως $f(\xi, \eta)$ δίνεται από τη σχέση:

$$f(\xi, \eta) = E(\xi, \eta)r(\xi, \eta) \cos(\theta_r). \quad (3.2.1)$$

Η συνάρτηση $r(\xi, \eta)$ περιγράφει την ανακλαστικότητα της επιφάνειας του αντικειμένου. Η γωνία θ_r είναι η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας ακτίνας και της τοπικής καθέτου στην επιφάνεια. Το ανακλώμενο φως προσπίπτει στο μηχανισμό καταγραφής. Εάν η εικόνα είναι ασπρόμαυρη, τότε οι διαφορές φωτεινότητας γίνονται αντιληπτές σαν τόνοι του γκρι. Βέβαια, η οπτική και η γεωμετρία καταγραφής είναι πολύ πιο πολύπλοκη από αυτή του απλουστευμένου μοντέλου του σχήματος 3.2.1. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό είναι αρκετό για την ανάλυση που χρειαζόμαστε.



Σχήμα 3.2.1: Ανάκλαση του φωτός.



Σχήμα 3.2.2: Γεωμετρικό μοντέλο του οπτικού συστήματος.

Η φωτεινότητα $f(\xi, \eta)$ στο επίπεδο του αντικειμένου προσπίπτει στο οπτικό σύστημα του μέσου καταγραφής, το οποίο συνήθως είναι ένα σύστημα φακών. Η έξοδος του συστήματος αυτού είναι η φωτεινότητα $b(x, y)$ στο επίπεδο της εικόνας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.2.

Η φωτεινότητα δεν μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές. Επομένως:

$$f(\xi, \eta) \geq 0, \quad b(x, y) \geq 0. \quad (3.2.2)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι της μορφής $h(x, y, \xi, \eta, f(\xi, \eta))$. Επομένως, η έξοδος του οπτικού συστήματος περιγράφεται από τη σχέση:

$$b(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y, \xi, \eta, f(\xi, \eta)) d\xi d\eta. \quad (3.2.3)$$

Συνήθως, το οπτικό σύστημα θεωρείται ότι είναι γραμμικό και χωρικά αμετάβλητο. Επομένως, η σχέση (3.2.3) παίρνει τη μορφή διδιάστατης συνέλιξης:

$$b(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta \triangleq f(x, y) ** h(x, y). \quad (3.2.4)$$

Ερωτήσεις κατανόησης

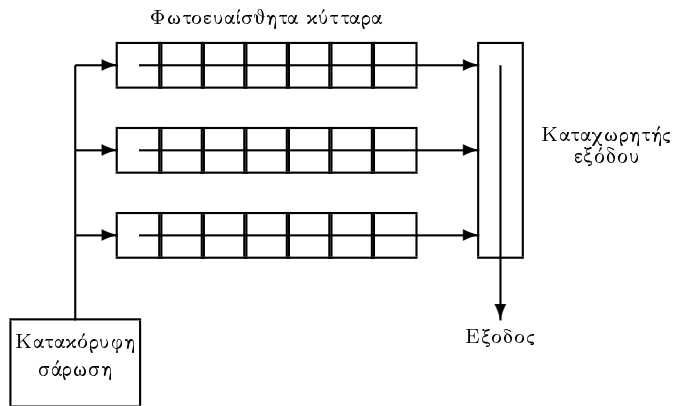
1. Όταν τα $E(\xi, n)$ και $r(\xi, n)$ είναι σταθερά, τι απεικονίζει η εικόνα $f(\xi, n)$;
2. Όταν τα $E(\xi, n)$ και η γεωμετρία του αντικειμένου ($\cos \theta_r$) είναι σταθερά, τι απεικονίζει η εικόνα $f(\xi, n)$;

3.3 ΟΠΤΙΚΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Οι κυριότεροι οπτικοί αισθητήρες που μας ενδιαφέρουν είναι οι φωτοηλεκτρικοί. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να οδηγήσουν κατευθείαν στην δημιουργία ψηφιακής εικόνας. Σήμερα, η πιο διαδεδομένη τεχνολογία, πάνω στην οποία στηρίζεται η τεχνολογία των ψηφιακών καμερών, είναι η τεχνολογία CCD (Charge Coupled Device). Τα CCDs έχουν αντικαταστήσει τις βιντεοκάμερες βασισμένες σε σωλήνες κενού και το φιλμ στις συμβατικές φωτογραφικές μηχανές. Τα CCDs εφαρμόζονται ευρέως σε μια ποικιλία επιστημονικών, αστρονομικών, βιοϊατρικών και άλλων περιοχών εμπορικής εκμετάλλευσης της εικόνας.

Μια κάμερα υψηλής ανάλυσης κατασκευάζεται πάνω σε ένα εξαιρετικά ευαίσθητο ολοκληρωμένο κύκλωμα, σε συνδυασμό με ένα κατάλληλο φακό, μία ψυκτική μέθοδο και λειτουργικά ηλεκτρονικά. Η δομή της κάμερας CCD, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.1, αποτελείται από ένα πλέγμα φωτοευαίσθητων κυττάρων. Το προσπίπτον φως δημιουργεί ηλεκτρικό φορτίο στα ημιαγωγικά κύτταρα. Τα φορτία αυτά μεταφέρονται προς τα δεξιά και διαβάζονται στον καταχωρητή εξόδου. Δηλαδή το CCD από μόνο του παράγει διακριτή εικόνα. Στην έξοδο, τα ηλεκτρικά φορτία (ένα για κάθε κύτταρο) μπορούν να ψηφιοποιηθούν και οι αριθμοί (ένας ανά pixel) να αποθηκευτούν π.χ. σε σκληρό δίσκο.

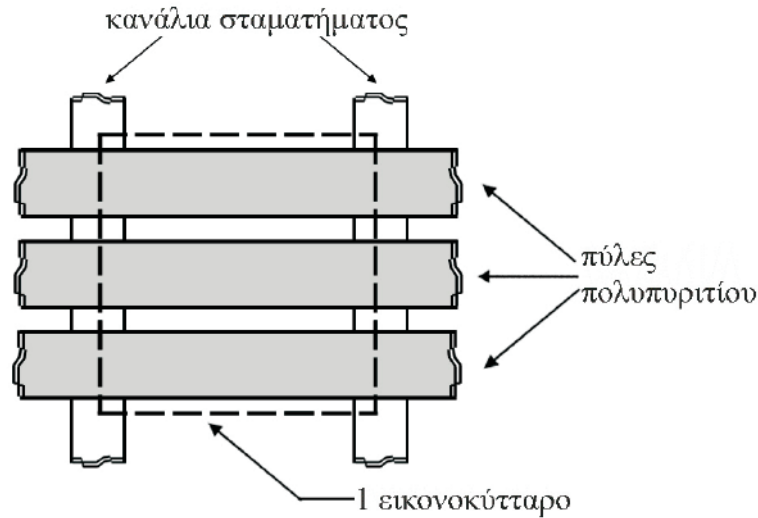
Ένα εικονοστοιχείο CCD φαίνεται στο σχήμα 3.3.2. Αποτελείται από τρεις πύλες πολυπυριτίου προσανατολισμένες κάθετα σε δύο κανάλια



Σχήμα 3.3.1: Δομή κάμερας CCD.

περιοχής σταματήματος (channel stops). Μεταξύ των καναλιών περιοχής σταματήματος βρίσκεται το πηγάδι φορτίων του CCD μεγέθους 1 εικονοκυττάρου. Εάν το δυναμικό στο μέσο ηλεκτρόδιο είναι θετικότερο από αυτό που εφαρμόζεται σε καθεμία εκ των άλλων δύο πυλών, κάτω από τη μεσαία πύλη σχηματίζεται ένα ελάχιστο τοπικής δυναμικής ενέργειας. Όταν τα φωτόνια χτυπούν το εικονοκύτταρο, λόγω της φωτοηλεκτρικής ενεργειακής μετατροπής, δημιουργούνται ζευγάρια ηλεκτρονίου - οπής. Τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται μέσα στο ελάχιστο δυναμικό θα συλλέγονται εκεί. Τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται στο κανάλι περιοχής σταματήματος ή στο υπόστρωμα κάτω από το εικονοκύτταρο μπορεί να διασκορπιστούν στο ελάχιστο και να συλλεχθούν. Σε κάθε περίπτωση, οι οπές διασκορπίζονται και συλλέγονται στο υπόστρωμα τύπου p. Η ποσότητα φορτίου που συλλέγεται στο εικονοκύτταρο σχετίζεται σχεδόν γραμμικά με την ένταση της ροής των φωτονίων και τον χρόνο κατά τη διάρκεια του οποίου το φως επιτρέπεται να προσπίπτει στο εικονοκύτταρο (χρόνος ολοκλήρωσης). Υπάρχουν δομές CCD που χρησιμοποιούν μία ή δύο ή τέσσερις πύλες πολυπυριτίου για να καθορίσουν ένα εικονοκύτταρο. Συνήθως τα κύτταρα έχουν τετραγωνική μορφή και είναι διατεταγμένα σε τετραγωνική διάταξη δειγματοληψίας. Υπάρχουν όμως και αισθητήρες CCD, που έχουν

εικονοκύτταρα με οκταγωνικό σχήμα διατεταγμένα σε ρομβοειδή διάταξη (τετραγωνική διάταξη περιστραμμένη κατά 45°), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.3.



Σχήμα 3.3.2: Τριφασικό εικονοστοιχείο CCD.

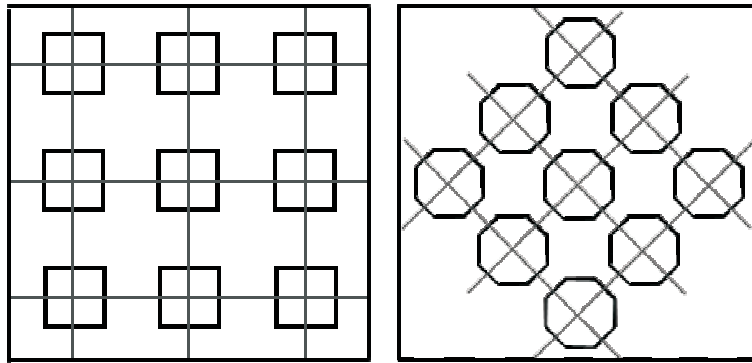
Για την ψηφιοποίηση έγχρωμων εικόνων χρησιμοποιούνται φωτογραφικές μηχανές με τρεις CCD αισθητήρες. Ένα κατάλληλα τοποθετημένο πρίσμα αναλύει το φως στις τρεις συνιστώσες RGB και κάθε μια τους διεγείρει έναν χωριστό αισθητήρα CCD. Έτσι παράγονται έγχρωμες ψηφιακές εικόνες πολύ καλής ποιότητας. Υπάρχουν και φωτογραφικές μηχανές με έναν μόνον αισθητήρα και τρία οπτικά φίλτρα RGB, που όμως παράγουν εικόνες χειρότερης ποιότητας.

Ένα απλοποιημένο μοντέλο καταγραφής της εικόνας με αισθητήρα CCD είναι της μορφής:

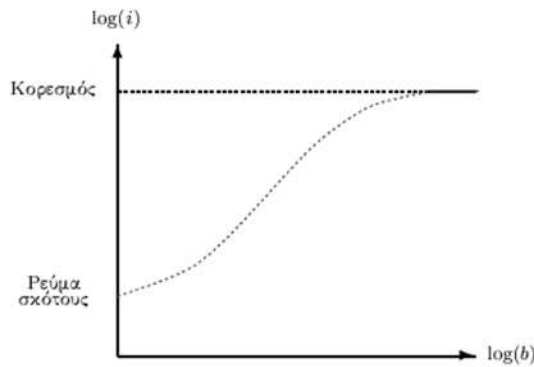
$$i = g^\gamma (b + n)^\gamma, \quad (3.3.1)$$

όπου b είναι η φωτεινότητα εισόδου, i είναι το φορτίο εξόδου (δηλαδή η φωτεινότητα της ψηφιακής εικόνας), g είναι το κέρδος (*gain*) του αισθητήρα (που μπορεί και να ρυθμίζεται αυτόματα) και n είναι ο φωτοηλεκτρικός θόρυβος. Ο συντελεστής γ μπορεί να εκτιμηθεί για κάθε αισθητήρα και είναι, για διάφορες κάμερες, στην περιοχή 0.55 μέχρι 1.00 [WIT05].

Στο σχήμα 3.3.4 απεικονίζεται η καμπύλη απόκρισης των αισθητήρων CCD. Το κεντρικό τμήμα της καμπύλης απόκρισης αντιστοιχεί στην



Σχήμα 3.3.3: (α) Τετραγωνική διάταξη κυττάρων CCD. (β) Ρομβοειδής διάταξη οκταγωνικών κυττάρων CCD.



Σχήμα 3.3.4: Απόκριση φωτεινότητας αισθητήρων CCD .

σχέση (3.3.1), όταν παραβλέψουμε τον θόρυβο καταγραφής. Για πολύ χαμηλούς φωτισμούς έχουμε μικρό ρεύμα σκότους, ενώ για πολύ μεγάλες φωτεινότητες εισόδου έχουμε κορεσμό του αισθητήρα. Γενικά, οι CCD αισθητήρες έχουν μεγάλη δυναμική περιοχή απεικόνισης.

Ένας άλλος τρόπος δημιουργίας ψηφιακών εικόνων είναι μέσω σάρωσης κειμένων, τυπωμένων φωτογραφιών ή φιλμ. Οι σαρωτές (scanners) είναι, στην ουσία, μονοδιάστατες φωτογραφικές μηχανές τεχνολογίας συνήθως CCD. Οι πιο συνηθισμένοι είναι οι επίπεδοι σαρωτές (flatbed). Η σελίδα προς ψηφιοποίηση εισάγεται στον σαρωτή και σαρώνεται από πάνω προς τα κάτω με χρήση μιας γραμμικής φωτεινής πηγής (λυχνία ξένου ή κρύου καθοδικού φωτισμού) και τριών σειρών αισθητήρων CCD (μια για κάθε χρώμα κόκκινο, πράσινο, μπλε). Όταν τελειώσει η σάρωση μιας σειράς, ψηφιοποιούνται τα ηλεκτρικά φορτία του CCD και

στέλνονται στον δίσκο του υπολογιστή. Αμέσως μετά, ένας βηματικός κινητήρας μετακινεί την γραμμική φωτεινή πηγή και την κάμερα στην αμέσως επόμενη θέση, ώστε να σαρωθεί η επόμενη σειρά. Η γραμμική πυκνότητα των αισθητήρων CCD ορίζει την οπτική ανάλυση του σαρωτή σε dpi (dots per inch), δηλαδή την συχνότητα δειγματοληψίας (π.χ. 600 dpi). Ο βηματικός κινητήρας κινείται με τέτοιο τρόπο, ώστε να έχουμε ίδια συχνότητα δειγματοληψίας και κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη κατεύθυνση.

Ερωτήσεις κατανόησης

1. Τι προτιμούμε: να ψηφιοποιήσουμε ένα φιλμ ενός αντικειμένου με σαρωτή ή να χρησιμοποιήσουμε μια φωτογραφική μηχανή CCD για ψηφιακή φωτογράφιση του αντικειμένου;
2. Γιατί σε βραδυνές λήψεις αγώνων ποδοσφαίρου, η κάμερα CCD μας δείχνει τους προβολείς του γηπέδου με φωτεινή «ουρά», όταν η κάμερα κινείται;
3. Μια απλή κάμερα CCD βγάζει αναλογικό ή ψηφιακό σήμα;

3.4 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΓΑΜΜΑ

Όπως αναφέρθηκε, τα σήματα εξόδου των περισσότερων φωτογραφικών μηχανών δεν συνδέονται γραμμικά με τις πραγματικές χρωματικές τιμές, αλλά η μεταξύ τους σχέση έχει την εξής μη γραμμική μορφή:

$$v_c = b_c^{\gamma_c}, \quad (3.4.1)$$

όπου b_c είναι η πραγματική τιμή φωτεινότητας και το v_c είναι η έξοδος της κάμερας. Ομοίως, οι περισσότερες από τις συσκευές απεικόνισης υποφέρουν από μια παρόμοια μη γραμμική σχέση μεταξύ της εισόδου τους v_d και της απεικονιζόμενης φωτεινής έντασης b_d :

$$b_d = v_d^{\gamma_d}. \quad (3.4.2)$$

Το γ_d στις περισσότερες οθόνες κυμαίνεται από 2.2 ως 2.5. Προκειμένου να απεικονισθούν σωστά οι φωτεινότητες του αντικειμένου, θα πρέπει να εφαρμοστεί μια αντίστροφη λειτουργία στην έξοδο της κάμερας. Ομοίως,

προτού σταλούν οι φωτεινότητες της ψηφιακής εικόνας για απεικόνιση, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση του συντελεστή γ_d της οθόνης. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή με τον όρο διόρθωση γ (*gamma correction*).

Αν το v_c αναπαριστά τη φωτεινότητα εξόδου της κάμερας, τότε το σήμα v_d που προκύπτει από τη διόρθωση γ της ψηφιακής εικόνας δίνεται από τη σχέση:

$$v_d = v_c^{\frac{1}{\gamma e \gamma_d}}. \quad (3.4.3)$$

Η διόρθωση γ περιπλέκεται πολύ περισσότερο στην περίπτωση της έγχρωμης εικόνας, γιατί πρέπει να γίνει διόρθωση και στα τρία RGB κανάλια της. Αυτό γίνεται ακόμα πιο δύσκολο, αν η ψηφιακή εικόνα έχει υποστεί αλλαγή χρωματικών συντεταγμένων, όπως περιγράφεται σε επόμενη ενότητα.

3.5 ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΑΣ

Το ηλεκτρικό ρεύμα $i(x, y)$ που παράγεται από τον φωτοηλεκτρικό ανιχνευτή είναι αναλογικό σήμα. Για να επεξεργαστεί ψηφιακά πρέπει να διακριτοποιηθεί και να ψηφιοποιηθεί. Αυτό γίνεται από τον *ψηφιοποιητή εικόνας* (*frame grabber*) που περιέχει έναν μετατροπέα A/D και μετατρέπει το αναλογικό σήμα $i_a(x, y)$ σε διακριτό $i(n_1, n_2)$:

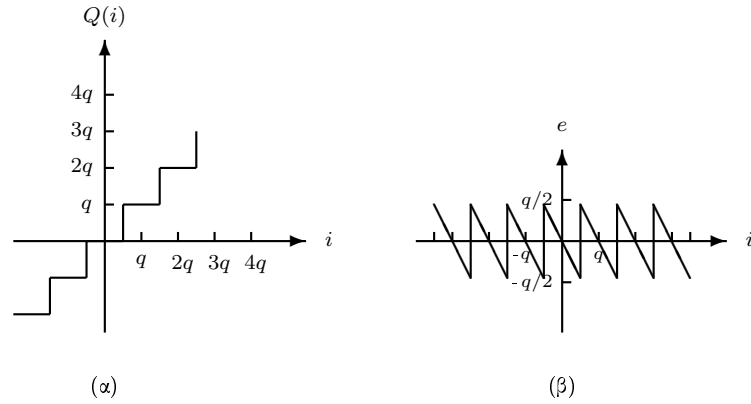
$$i(n_1, n_2) = i_a(n_1 T_1, n_2 T_2). \quad (3.5.1)$$

Το κάθε ένα δείγμα $i(n_1, n_2)$ ονομάζεται εικονοστοιχείο (pixel). Οι ψηφιακές εικόνες περιέχουν συνήθως 1024×1024 (ή και πολύ περισσότερα) εικονοστοιχεία. Κάθε εικονοστοιχείο αναπαριστάται από b bits. Συνήθως, κάθε εικονοστοιχείο έχει 8 bits και μπορεί να αναπαραστήσει 256 επίπεδα φωτεινότητας. Το 0 αναπαριστά το μαύρο επίπεδο και το 255 το λευκό επίπεδο. Ο A/D μετατροπέας κλιμακώνει το σήμα σε επίπεδα i_q , $i = 1, 2, 3, \dots$ όπου:

$$q = 2^{-b}. \quad (3.5.2)$$

Η κλιμάκωση αυτή δημιουργεί λάθη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.1. Το λάθος κλιμάκωσης εμφανίζεται σαν αθροιστικό λάθος:

$$i_r(n_1, n_2) = i(n_1, n_2) + e(n_1, n_2). \quad (3.5.3)$$



Σχήμα 3.5.1: (α) Σχέση εισόδου-εξόδου του κλιμακωτή. (β) Λάθος κλιμάκωσης.

Η ισχύς P_e του λάθους μπορεί να υπολογισθεί ολοκληρώνοντας σε μια περίοδο:

$$P_e = \frac{1}{q} \int_{-\frac{q}{2}}^{\frac{q}{2}} (-i)^2 di = \frac{q^2}{12} = \frac{2^{-2b}}{12}. \quad (3.5.4)$$

Εάν P_i είναι η ισχύς του σήματος της εικόνας, ο λόγος σήματος προς θόρυβο SNR δίνεται από τη σχέση:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_i}{P_e} \right) = 10 \log_{10} P_i + 10.8 + 6b. \quad (3.5.5)$$

Επομένως, κάθε επιπλέον bit στο μετατροπέα A/D αυξάνει το λόγο σήματος προς θόρυβο κατά 6 dB.

Η ψηφιακή εικόνα μπορεί να αναπαρασταθεί σαν ένας πίνακας \mathbf{i} διαστάσεων $N \times M$:

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i(1,1) & \dots & i(1,M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ i(N,1) & \dots & i(N,M) \end{bmatrix}, \quad (3.5.6)$$

ή σαν διάνυσμα NM στοιχείων: $\mathbf{i} = [i(1,1), \dots, i(1,M), \dots, i(N,M)]^T$. Η διανυσματική παράσταση διευκολύνει πολύ τους συμβολισμούς σε αρκετές πολύπλοκες ψηφιακές μεθόδους επεξεργασίας της εικόνας. Παρακάτω θα αναφέρουμε ορισμένες απλές περιπτώσεις. Η πρόσθεση δύο εικόνων \mathbf{i} και \mathbf{f} συμβολίζεται με:

$$\mathbf{s} = \mathbf{i} + \mathbf{f}. \quad (3.5.7)$$

Μια μη γραμμικότητα χωρίς μνήμη $r(\cdot)$ μπορεί να παρασταθεί με:

$$\mathbf{s} = r(\mathbf{i}). \quad (3.5.8)$$

Ένας συνελικτικός τελεστής h έχει σαν είσοδο μια εικόνα διαστάσεων $N \times M$ και σαν έξοδο μια εικόνα ίδιων διαστάσεων (αν ληφθούν κατάλληλα υπ'όψη οι οριακές συνθήκες). Επομένως, ο τελεστής h μπορεί να περιγραφεί από έναν πίνακα \mathbf{H} διαστάσεων $NM \times NM$ που επιδρά πάνω στο διάνυσμα εισόδου \mathbf{f} :

$$\mathbf{s} = \mathbf{H}\mathbf{f}. \quad (3.5.9)$$

Ο πίνακας \mathbf{H} έχει την εξής μορφή:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0 & \mathbf{H}_{M-1} & \dots & \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_1 & \mathbf{H}_0 & \mathbf{H}_{M-1} & \ddots & \mathbf{H}_2 \\ \vdots & \mathbf{H}_1 & \mathbf{H}_0 & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{M-2} & \ddots & \ddots & \ddots & \mathbf{H}_{M-1} \\ \mathbf{H}_{M-1} & \mathbf{H}_{M-2} & \dots & \mathbf{H}_1 & \mathbf{H}_0 \end{bmatrix}. \quad (3.5.10)$$

Ο κάθε υποπίνακας έχει τη μορφή:

$$\mathbf{H}_j = \begin{bmatrix} h_e(j, 0) & h_e(j, N-1) & \dots & h_e(j, 2) & h_e(j, 1) \\ h_e(j, 1) & h_e(j, 0) & h_e(j, N-1) & \ddots & h_e(j, 2) \\ \vdots & h_e(j, 1) & h_e(j, 0) & \ddots & \vdots \\ h_e(j, N-2) & \ddots & \ddots & \ddots & h_e(j, N-1) \\ h_e(j, N-1) & h_e(j, N-2) & \dots & h_e(j, 1) & h_e(j, 0) \end{bmatrix}. \quad (3.5.11)$$

Οι πίνακες της μορφής (3.5.11) ονομάζονται *κυκλοτικοί πίνακες* (*circulant matrices*). Ο πίνακας \mathbf{H} αποτελείται από κυκλοτικούς υποπίνακες και για το λόγο αυτό ονομάζεται *ομαδικά κυκλοτικός πίνακας* (*block circulant matrix*). Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι η σχέση (3.5.9) είναι ισοδύναμη με τη διδιάστατη γραμμική συνέλιξη:

$$s_e(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_e(m, n) h_e(x-m, y-n), \quad (3.5.12)$$

για $x = 0, 1, \dots, M-1$ και $y = 0, 1, \dots, N-1$, όπου:

$$f_e(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & 0 \leq x \leq P_1 - 1 \quad \text{και} \quad 0 \leq y \leq P_2 - 1 \\ 0 & P_1 \leq x \leq M-1 \quad \text{ή} \quad P_2 \leq y \leq N-1 \end{cases} \quad (3.5.13)$$

$$h_e(x, y) = \begin{cases} h(x, y) & 0 \leq x \leq Q_1 - 1 \quad \text{και} \quad 0 \leq y \leq Q_2 - 1 \\ 0 & Q_1 \leq x \leq M - 1 \quad \text{ή} \quad Q_2 \leq y \leq N - 1 \end{cases} \quad (3.5.14)$$

$$M \geq P_1 + Q_1 - 1 \quad (3.5.15)$$

$$N \geq P_2 + Q_2 - 1. \quad (3.5.16)$$

Εάν συμβολίσουμε με \mathbf{f} μια εικόνα, με \mathbf{H} τη συνάρτηση μεταφοράς του οπτικού συστήματος και με $r(\cdot)$ τη μη γραμμικότητα καταγραφής, τότε το μαθηματικό μοντέλο καταγραφής γράφεται ως εξής:

$$\mathbf{i} = r(\mathbf{H}\mathbf{f}). \quad (3.5.17)$$

Σε αρκετές περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να κάνουμε πιθανοκρατικό χαρακτηρισμό μιας εικόνας. Στην περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας είναι μια τυχαία μεταβλητή. Η εικόνα συνολικά έχει μια κατανομή πιθανοτήτων της μορφής:

$$p(\mathbf{i}) = p\{i(1, 1), \dots, i(N, M)\}. \quad (3.5.18)$$

Εάν η κατανομή πιθανότητας είναι Γκαουσιανή, έχει τη μορφή:

$$p(\mathbf{i}) = (2\pi)^{-\frac{NM}{2}} |\mathbf{C}_i|^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{i} - \mathbf{m}_i)^T \mathbf{C}_i^{-1} (\mathbf{i} - \mathbf{m}_i) \right], \quad (3.5.19)$$

όπου το διάνυσμα \mathbf{m}_i συμβολίζει τη μέση τιμή της εικόνας, ο πίνακας \mathbf{C}_i τη μεταβλητότητα της εικόνας και $|\mathbf{C}_i|$ είναι η ορίζουσα του πίνακα \mathbf{C}_i . Μια πιθανοκρατική εικόνα έχει μέση τιμή \mathbf{m}_i :

$$\mathbf{m}_i = E[\mathbf{i}] = \{E[i(n_1, n_2)]\} \quad (3.5.20)$$

και πίνακα αυτοσυσχέτισης \mathbf{R}_i διαστάσεων $NM \times NM$:

$$\mathbf{R}_i = E[\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}^{*T}] = \{E[i(n_1, n_2) i^*(n_3, n_4)]\}. \quad (3.5.21)$$

Ο πίνακας μεταβλητότητας \mathbf{C}_i (autocovariance matrix) δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{R}_i - \mathbf{m}_i \mathbf{m}_i^{*T}. \quad (3.5.22)$$

Από τη θεωρία των γραμμικών συστημάτων είναι γνωστό ότι αν ένα σήμα (εικόνα) \mathbf{i} περάσει από ένα σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς \mathbf{H} , τότε η μέση τιμή \mathbf{m}_s και ο πίνακας αυτοσυσχέτισης \mathbf{R}_s της εξόδου \mathbf{s} δίνονται από τις σχέσεις:

$$\mathbf{m}_s \triangleq E[\mathbf{s}] = \mathbf{H}\mathbf{m}_i \quad (3.5.23)$$

$$\mathbf{R}_s \triangleq E[\mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^{*T}] = \mathbf{H}\mathbf{R}_i\mathbf{H}^{*T}. \quad (3.5.24)$$

Ερωτήσεις κατανόησης

1. Ποιο είναι το βήμα κβαντισμού q για αναπαράσταση pixel των 8 bits;
2. Γιατί είναι σημαντικές οι σχέσεις (3.5.23 – 3.5.24);

3.6 ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ

Ο ηλεκτρονικός θόρυβος καταγραφής είναι δύο διαφορετικών ειδών: α) θερμικός θόρυβος με κανονική κατανομή μέσης τιμής μηδέν και β) φωτοηλεκτρικός θόρυβος. Ο τύπος αυτός του θορύβου έχει σχέση με την τυχαιότητα πρόσπτωσης των φωτονίων στην φωτοευαίσθητη επιφάνεια. Εάν η πυκνότητα πρόσπτωσης είναι μικρή, ο φωτοηλεκτρικός θόρυβος ακολουθεί στατιστικές Bose-Einstein. Διαφορετικά ακολουθεί την κατανομή Poisson. Το μοντέλο του θορύβου αυτού είναι πολλαπλασιαστικό:

$$i_r(x, y) = c_2[b(x, y)]^\gamma + \{c_2[b(x, y)]^\gamma\}^{\frac{1}{2}}n(x, y). \quad (3.6.1)$$

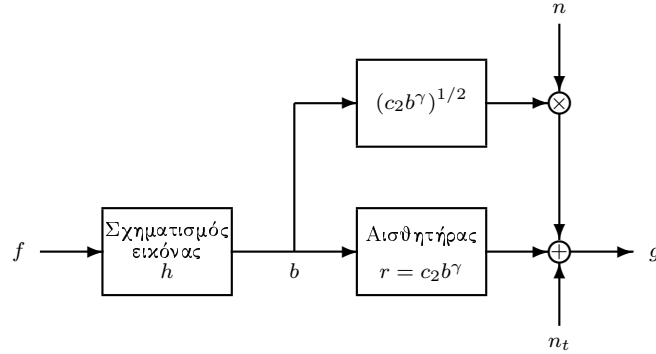
Ο θόρυβος $n(x, y)$ είναι κανονικής κατανομής, έχει μέση τιμή μηδέν και μοναδιαία μεταβλητότητα. Εάν λάβουμε υπόψη τη συνάρτηση μεταφοράς του οπτικού συστήματος και τον αθροιστικό θερμικό θόρυβο, τότε καταλήγουμε στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει όλο το σύστημα καταγραφής της εικόνας:

$$g(x, y) = c_2[f(x, y) ** h(x, y)]^\gamma + \{c_2[f(x, y) ** h(x, y)]^\gamma\}^{\frac{1}{2}}n(x, y) + n_t(x, y). \quad (3.6.2)$$

Το μοντέλο αυτό περιγράφεται παραστατικά στο σχήμα 3.6.1.

Ένας άλλος τύπος θορύβου που έχει ενδιαφέρον για τη μετάδοση ψηφιακών εικόνων είναι ο κρουστικός θόρυβος (*impulsive noise, salt-pepper noise*). Εμφανίζεται σαν μαύρες ή άσπρες κουκίδες πάνω στην εικόνα. Έχει την παρακάτω μορφή:

$$n(k, j) = \begin{cases} z(k, j) & \text{με πιθανότητα } p \\ i(k, j) & \text{με πιθανότητα } 1 - p. \end{cases} \quad (3.6.3)$$



Σχήμα 3.6.1: Μοντέλο του συστήματος καταγραφής εικόνας.

Οι παλμοί συμβολίζονται με $z(k, j)$ και τα εικονοστοιχεία της αρχικής εικόνας με $i(k, j)$. Ο κρουστικός θόρυβος $z(k, j)$ συνήθως έχει πολύ διαφορετική κατανομή από αυτήν της αρχικής εικόνας. Μια εικόνα η οποία έχει «μολυνθεί» με αθροιστικό θόρυβο, πολλαπλασιαστικό θόρυβο, ή κρουστικό θόρυβο, φαίνεται στο σχήμα 3.6.2.

3.7 ΧΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Η εποπτική αίσθηση των χρωματικών εικόνων είναι πιο πλούσια από αυτή των ασπρόμαυρων εικόνων. Για τον λόγο αυτό, σήμερα χρησιμοποιούμε σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές έγχρωμες φωτογραφικές μηχανές. Η αναπαράσταση του χρώματος βασίζεται στη θεωρία του T. Young (1802) [WYZ00], η οποία υποστηρίζει ότι οποιοδήποτε χρώμα μπορεί να παραχθεί με την ανάμειξη τριών θεμελιωδών χρωμάτων C_1, C_2, C_3 με κατάλληλες αναλογίες:

$$C = aC_1 + bC_2 + cC_3. \quad (3.7.1)$$

Αυτή η θεωρία είναι σύμφωνη με το γεγονός ότι το ανθρώπινο μάτι έχει τρία διαφορετικά είδη κωνίων στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του. Αυτά έχουν μέγιστες αποκρίσεις στις κίτρινες - πράσινες, πράσινες και μπλε περιοχές του ορατού φάσματος του φωτός, αντίστοιχα. Σύμφωνα με την εξίσωση (3.7.1), κάθε έγχρωμο εικονοστοιχείο της εικόνας μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα διάνυσμα $[a, b, c]^T$ στον τρισδιάστατο χώρο



Σχήμα 3.6.2: (α) Αρχική εικόνα. (β) Εικόνα με αθροιστικό θόρυβο. (γ) Εικόνα με πολλαπλασιαστικό θόρυβο. (δ) Εικόνα με κρουστικό θόρυβο.

(C_1, C_2, C_3) . Ακολούθως, θα παραλείψουμε τους συντελεστές a, b, c και θα χρησιμοποιήσουμε τη σημειογραφία C_1, C_2, C_3 για την αναπαράσταση του χρώματος. Οι επιμέρους χρωματικότητες σε ένα χρώμα ορίζονται από τις αναλογίες:

$$c_i = \frac{C_i}{C_1 + C_2 + C_3} \quad i = 1, 2, 3. \quad (3.7.2)$$

Είναι ξεκάθαρο ότι μόνο δύο χρωματικές συντεταγμένες, για παράδειγμα οι c_1, c_2 , είναι ανεξάρτητες, διότι:

$$c_1 + c_2 + c_3 = 1. \quad (3.7.3)$$

Οι χρωματικές συντεταγμένες c_1, c_2 προβάλλουν τον τρισδιάστατο χώρο (C_1, C_2, C_3) σε ένα διδιάστατο επίπεδο (c_1, c_2) . Ολόκληρος ο χρωματικός χώρος περιγράφεται από την τριάδα (c_1, c_2, Y) , όπου Y δίνεται από:

$$Y = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.7.4)$$

και αναπαριστά την φωτεινότητα (luminance) της εικόνας.

Διάφορα συστήματα συντεταγμένων χρώματος προτάθηκαν στο παρελθόν [WYZ00]. Η CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) πρότεινε το θεμελιώδες φασματικό σύστημα RGB, σε αντιστοιχία με τις μονοχρωματικές θεμελιώδεις πηγές R_{CIE} (red 700 nm), G_{CIE} (green 546.1 nm) και B_{CIE} (blue 435.8 nm). Το λευκό χρώμα αναφοράς έχει $R_{CIE} = G_{CIE} = B_{CIE} = 1$. Το θεμελιώδες φασματικό σύστημα CIE RGB δεν μπορεί να αποδώσει όλα τα χρώματα που μπορούν να αναπαραχθούν. Για το λόγο αυτό, η CIE πρότεινε το θεμελιώδες σύστημα XYZ με υποθετικές (μη ρεαλιστικές) συντεταγμένες X, Y, Z. Οι χρωματικές συντεταγμένες XYZ είναι γραμμικά συσχετισμένες με το θεμελιώδες σύστημα RGB ως εξής:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.490 & 0.310 & 0.200 \\ 0.177 & 0.813 & 0.011 \\ 0.000 & 0.010 & 0.990 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{CIE} \\ G_{CIE} \\ B_{CIE} \end{bmatrix}. \quad (3.7.5)$$

Το λευκό χρώμα αναφοράς αναπαρίσταται με $X = Y = Z = 1$. Οι χρωματικές συντεταγμένες:

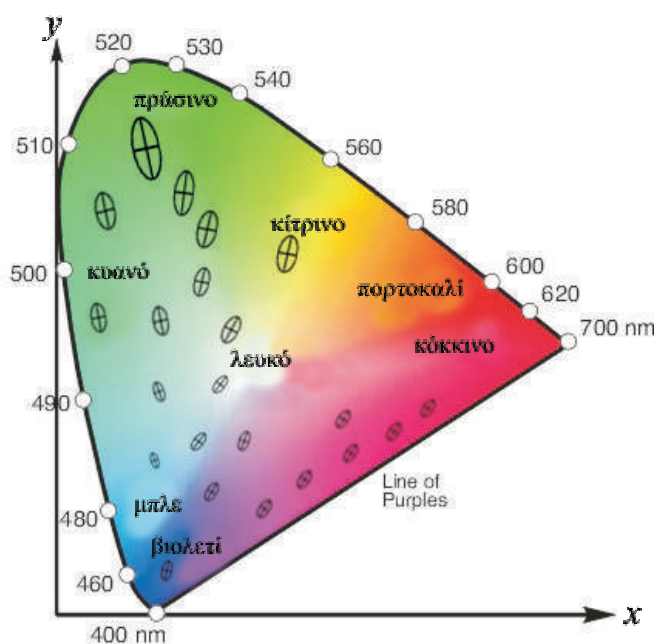
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3.7.6)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3.7.7)$$

μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να παραχθεί το χρωματικό διάγραμμα το οποίο φαίνεται στο σχήμα 3.7.1. Οι ελλείψεις που παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα αντιστοιχούν σε χρώματα που δεν είναι διακριτά σαν διαφορετικά από το ανθρώπινο μάτι. Φαίνεται καθαρά ότι ο προσανατολισμός και το μέγεθός τους ποικίλουν. Συνεπώς, οι χρωματικές διαφορές δεν μπορούν να καθοριστούν με έναν ομοιόμορφο τρόπο στο επίπεδο (x, y) . Ένα ομοιόμορφο χρωματικά σύστημα, το UCS, προτάθηκε για να υπερκεραστεί το προαναφερθέν πρόβλημα. Οι συντεταγμένες του u, v, Y δίνονται από τις σχέσεις:

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (3.7.8)$$

$$v = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}. \quad (3.7.9)$$



Σχήμα 3.7.1: Διάγραμμα χρωματικότητας του συστήματος XYZ.

Η συνιστώσα Y στο σύστημα UCS είναι η ίδια με τη φωτεινότητα Y στο σύστημα XYZ. Οι συντεταγμένες του χρώματος U, V, W σε αυτό το σύστημα, οι οποίες αντιστοιχούν στις αναλογίες $u, v, w = 1 - u - v$, δίνονται από τις σχέσεις:

$$U = \frac{2X}{3} \quad (3.7.10)$$

$$V = Y \quad (3.7.11)$$

$$W = \frac{-X + 3Y + Z}{2}. \quad (3.7.12)$$

Ένα τροποποιημένο UCS σύστημα, το οποίο καλείται σύστημα $U^*V^*W^*$, προκύπτει με μετατόπιση από την αρχή των συντεταγμένων του συστήματος UCS στις συντεταγμένες του λευκού χρώματος αναφοράς (u_0, v_0) . Ο μετασχηματισμός που προκύπτει περιγράφεται από τις

ακόλουθες εξισώσεις:

$$W^* = 25(100Y)^{1/3} - 17 \quad 0.01 \leq Y \leq 1 \quad (3.7.13)$$

$$U^* = 13W^*(u - u_0) \quad (3.7.14)$$

$$V^* = 13W^*(v - v_0). \quad (3.7.15)$$

Αυτό το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό των χρωματικών διαφορών, διότι αυτές εκφράζονται με την Ευκλείδεια απόσταση στον χώρο $U^*V^*W^*$. Η διαφορά δύο χρωμάτων C_a, C_b , δηλώνεται ως ΔC , σύμφωνα με την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} \Delta C^2 &= (U_a^* - U_b^*)^2 + (V_a^* - V_b^*)^2 + (W_a^* - W_b^*)^2 \\ &= (\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2. \end{aligned} \quad (3.7.16)$$

Το σύστημα $L^*a^*b^*$:

$$L^* = 25(100Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad 1 \leq 100Y \leq 100 \quad (3.7.17)$$

$$a^* = 500[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}] \quad (3.7.18)$$

$$b^* = 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}] \quad (3.7.19)$$

επίσης χρησιμοποιείται για να μετρηθούν χρωματικές διαφορές. Οι συντεταγμένες (X_0, Y_0, Z_0) στις εξισώσεις (3.7.17-3.7.19) αντιστοιχούν στο λευκό φως αναφοράς. Με L^* δηλώνεται η φωτεινότητα (luminance). Οι συντεταγμένες a^*, b^* περιγράφουν το χρωματικό περιεχόμενο σε κόκκινο - πράσινο και κίτρινο - μπλε φως αντίστοιχα. Η χρωματική διαφορά ΔC στο L^*, a^*, b^* σύστημα εκφράζεται ως:

$$\Delta C^2 = (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2. \quad (3.7.20)$$

Τέλος, το σύστημα $L^*u^*v^*$ χρησιμοποιείται επίσης για να μετρώνται οι χρωματικές διαφορές. Ο αντίστοιχος μετασχηματισμός δίνεται από τις σχέσεις:

$$L^* = 25(100Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad (3.7.21)$$

$$u^* = 13L^*(u - u_0) \quad (3.7.22)$$

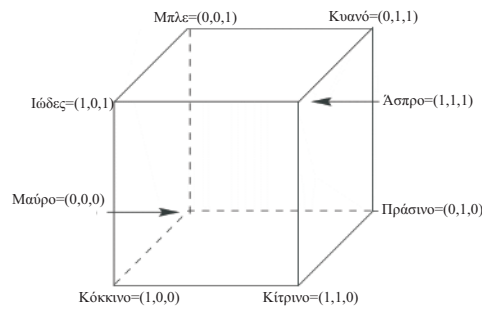
$$v^* = 13L^*(1.5v - v_0). \quad (3.7.23)$$

Οι συντεταγμένες Y_0, u_0, v_0 αντιστοιχούν στο λευκό αναφοράς. Ο τύπος της χρωματικής διαφοράς για τον χώρο $L^*U^*V^*$ δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta C^2 = (\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2. \quad (3.7.24)$$

Όλοι οι προαναφερθέντες μετασχηματισμοί μπορούν εύκολα να υπολογιστούν, αν και απαιτούν αρκετά πολύπλοκες πράξεις κινητής υποδιαστολής. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των μετασχηματισμών είναι αριθμοί κινητής υποδιαστολής. Κατά συνέπεια, οι απαιτήσεις σε αποθήκευση των μετασχηματισμένων έγχρωμων εικόνων είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερες σε σχέση με την πρωτότυπη έγχρωμη εικόνα, γιατί ένας αριθμός κινητής υποδιαστολής καταλαμβάνει τέσσερα bytes.

Εκτός από τα προαναφερθέντα συστήματα χρωματικών συντεταγμένων, χρωματικά μοντέλα έχουν επίσης προταθεί για μια περισσότερο κατάλληλη απεικόνιση της εικόνας σε ειδικές πλατφόρμες υλικού (hardware platforms). Για παράδειγμα, ένα ειδικό RGB χρωματικό σύστημα έχει προταθεί από τη National Television Systems Committee (NTSC) για την απεικόνιση έγχρωμων εικόνων σε οθόνες τηλεόρασης (CRT).



Σχήμα 3.7.2: Ο RGB χρωματικός κύβος.

Το NTSC RGB σύστημα είναι διαφορετικό από το CIE RGB θεμελιώδες φασματικό σύστημα, αν και τα δύο είναι γραμμικά συνδεδεμένα μεταξύ τους:

$$\begin{bmatrix} R_{CIE} \\ G_{CIE} \\ B_{CIE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.167 & -0.146 & -0.151 \\ 0.114 & 0.753 & 0.159 \\ -0.001 & 0.059 & 1.128 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (3.7.25)$$

Συνεπώς, το XYZ σύστημα είναι επίσης γραμμικά συσχετισμένο με το NTSC RGB σύστημα, σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.7.5) και (3.7.25):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.607 & 0.174 & 0.201 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.000 & 0.066 & 1.117 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (3.7.26)$$

Τέλος, το NTSC σύστημα μετάδοσης έγχρωμου βίντεο YIQ χρησιμοποιείται για τη μετάδοση έγχρωμου βίντεο που είναι συμβατή με τη μετάδοση μονοχρωματικού βίντεο.

Το YIQ μοντέλο χρησιμοποιείται στο σήμα εκπομπής τηλεόρασης NTSC. Το κύριο πλεονέκτημά του είναι ότι εγγυάται την προς τα πίσω συμβατότητα με τη μονοχρωματική τηλεόραση. Ο μετασχηματισμός από το NTSC RGB στο YIQ δίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (3.7.27)$$

Η φωτεινότητα αναπαρίσταται από τη συνιστώσα Y . Οι συνιστώσες I, Q κωδικοποιούν την χρωματικότητα της εικόνας. Όλοι οι προαναφερθέντες μετασχηματισμοί προγραμματίζονται σε κώδικα πολύ εύκολα.

Το Κυανό-Πορφυρό-Κίτρινο (Cyan Magenta Yellow - CMY) μοντέλο χρησιμοποιείται κατά κόρον στην εκτύπωση έγχρωμων εικόνων. Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 3.7.2, το κυανό (cyan), το ιώδες (magenta) και το κίτρινο (yellow) είναι συμπληρωματικά χρώματα του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε χρώματος αντίστοιχα. Ονομάζονται αφαιρετικά θεμελιώδη χρώματα, ενώ το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε καλούνται προσθετικά θεμελιώδη χρώματα. Στο CMY σύστημα, τα χρώματα καθορίζονται ανάλογα με το τι αφαιρείται από το λευκό φως. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στην εκτύπωση εικόνων, αφού το φως που ανακλάται από τα μελάνια είναι αυτό που προσπίπτει μείον αυτό που απορροφάται από την επιφάνεια πρόσπτωσης. Οι CMY συντεταγμένες εξάγονται εύκολα από το RGB σύστημα:

$$C = 1 - R \quad (3.7.28)$$

$$M = 1 - G \quad (3.7.29)$$

$$Y = 1 - B \quad (3.7.30)$$

και αντίστροφα. Το CMY σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτύπωση έγχρωμων εικόνων, αλλά λόγω των ατελειών της μελάνης, αυτό το σύστημα δεν μπορεί να αναπαράξει σωστά το μαύρο χρώμα. Συνεπώς, χρησιμοποιείται αντί αυτού το CMYK σύστημα:

$$K = \min(C, M, Y) \quad (3.7.31)$$

$$C = C - K \quad (3.7.32)$$

$$M = M - K \quad (3.7.33)$$

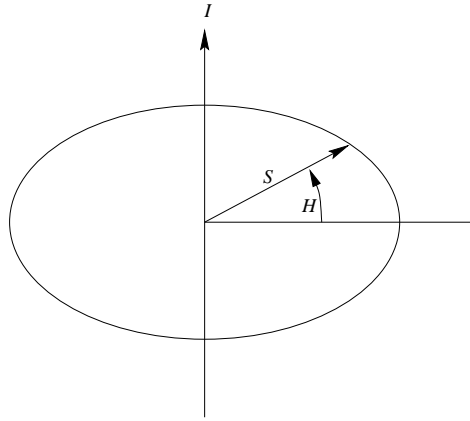
$$Y = Y - K. \quad (3.7.34)$$

Η συνιστώσα K αναπαριστά το μαύρο σαν ένα τέταρτο χρώμα. Ο τρόπος εκτύπωσης CMYK ονομάζεται τετραχρωμικός.

Όλα τα προηγούμενα χρωματικά μοντέλα που αναφέρθηκαν προκύπτουν είτε λόγω θεμάτων που αφορούν το υλικό (CMYK, YIQ) ή λόγω χρωματομετρικών ζητημάτων (XYZ, $L^*a^*b^*$, UCS, $U^*V^*W^*$, $L^*U^*V^*$). Τέτοια συστήματα δεν μπορούν να προσεγγίσουν καλά την ανθρώπινη οπτική διαίσθηση. Η ανθρώπινη αντίληψη του χρώματος συνήθως περιλαμβάνει τρεις ιδιότητές του, γνωστές σαν *απόχρωση (hue)*, *κορεσμός (saturation)* και *φωτεινότητα (brightness)*. Η απόχρωση χρησιμοποιείται στη διάκριση μεταξύ των χρωμάτων (π.χ. κόκκινο, κίτρινο, μπλε) και στον προσδιορισμό της ερυθρότητας ή της πρασινότητας κ.τ.λ. της εικόνας. Η απόχρωση μετρείται σαν η γωνία ανάμεσα στο πραγματικό διάνυσμα του χρώματος και σε ένα διάνυσμα αναφοράς καθαρού χρώματος (π.χ. κόκκινο). Αν η φωτεινή πηγή είναι μονοχρωματική, η απόχρωση είναι ένας δείκτης του μήκους κύματος του φωτός. Ο κορεσμός αποτελεί ένα κριτήριο της επί τοις εκατό αναλογίας του λευκού φωτός που προστίθεται σε ένα καθαρό χρώμα. Για παράδειγμα, το κόκκινο είναι ένα πολύ κορεσμένο χρώμα, ενώ το ροζ είναι λιγότερο κορεσμένο. Οι τόνοι του γκρι έχουν κορεσμό μηδέν. Η φωτεινότητα ενός χρώματος αναφέρεται στην αντιληπτή ένταση του φωτός που ανακλά ή εκπέμπει ένα αντικείμενο. Οι συντεταγμένες απόχρωσης, κορεσμού και φωτεινότητας ενός χρώματος φαίνονται στο σχήμα 3.7.3. Οι συντεταγμένες αυτές σχηματίζουν ένα κυλινδρικό σύστημα περιγραφής της χρωματικότητας. Η φωτεινότητα κυμαίνεται από καθαρό μαύρο μέχρι καθαρό λευκό χρώμα και ο κορεσμός κυμαίνεται από καθαρό γκριζο χρώμα μέχρι χρώματα υψηλού κορεσμού. Διάφορα χρωματικά μοντέλα αναπτύχθηκαν με σκοπό να αναπαραστήσουν την απόχρωση, τον κορεσμό και τη φωτεινότητα του χρώματος. Ένα τέτοιο σύστημα είναι το μοντέλο HSI (απόχρωση, κορεσμός, φωτεινή ένταση). Αποτελεί ένα κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων, ο άξονας του οποίου καθορίζεται από την γραμμή $R = G = B$ στον RGB χώρο, όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 3.7.4. Τα χρώματα τα οποία μπορούν να απεικονιστούν στο κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων HSI είναι αυτά που συμπεριλαμβάνονται μέσα στον κύβο RGB. Για το λόγο αυτό, η επιτρεπτή διακύμανση του κορεσμού είναι πολύ μικρή για υψηλές εντάσεις φωτισμού (κοντά στο λευκό) και για χαμηλές εντάσεις φωτισμού (κοντά στο μαύρο). Η μετατροπή

ενός χρώματος από τον χρωματικό χώρο RGB στο σύστημα συντεταγμένων HSI πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, οι RGB συντεταγμένες περιστρέφονται για να σχηματίσουν το σύστημα συντεταγμένων (I, V_1, V_2) , του οποίου ο άξονας καθορίζεται από τη γραμμή $R = G = B$. Αυτή η περιστροφή περιγράφεται από τον ακόλουθο γραμμικό μετασχηματισμό [HAR87]:

$$\begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 & \sqrt{3}/3 \\ 0 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 2/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (3.7.35)$$



Σχήμα 3.7.3: Ορισμοί της απόχρωσης, του κορεσμού και της φωτεινότητας ενός χρώματος.

Στο δεύτερο βήμα οι ορθογωνικές συντεταγμένες (V_1, V_2) μπορούν να μετασχηματιστούν σε πολικές συντεταγμένες:

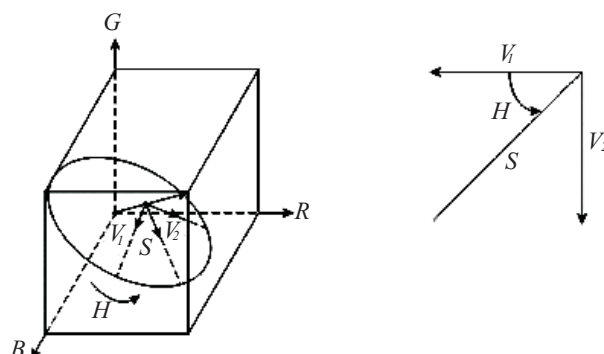
$$H = \tan^{-1}(V_2/V_1) \quad (3.7.36)$$

$$S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}. \quad (3.7.37)$$

Η περιοχή τιμών των συντεταγμένων της απόχρωσης είναι $[0, \dots, 2\pi]$ rad, ή ισοδύναμα, $[0^\circ, \dots, 360^\circ]$ μοίρες. Ο μετασχηματισμός από το HSI στο RGB σύστημα μπορεί να γίνει με την αντίστροφη διαδικασία:

$$V_1 = S \cos H \quad (3.7.38)$$

$$V_2 = S \sin H \quad (3.7.39)$$



Σχήμα 3.7.4: Ο χρωματικός χώρος HSI.



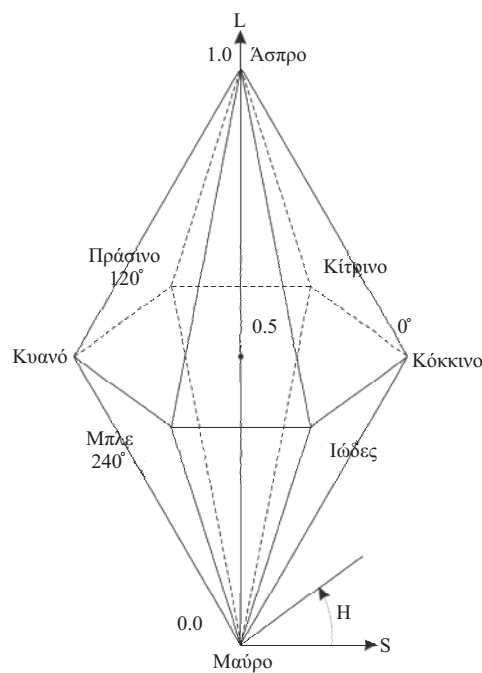
Σχήμα 3.7.5: (α) Εικόνα ανθρώπων. (β) Περιοχές προσώπου και δέρματος χρώματος ροζ.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/3 & 0 & 2/\sqrt{6} \\ \sqrt{3}/3 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} \\ \sqrt{3}/3 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}. \quad (3.7.40)$$

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές αυτού του συστήματος [NIB86], [PRA91]. Ωστόσο, όλες αυτές βασίζονται στην ίδια φιλοσοφία [HAR87]. Ένα παράδειγμα εφαρμογής του συστήματος HSI στην αναγνώριση περιοχών προσώπου (και ανθρώπινου δέρματος γενικότερα) φαίνεται στο σχήμα 3.7.5. Οι περιοχές του προσώπου χρώματος ροζ καταλαμβάνουν συγκεκριμένη χρωματική περιοχή στον χώρο HSI και μπορούν πολύ εύκολα να καταταμηθούν.

Ένα άλλο σύστημα χρωματικών συντεταγμένων που βασίζεται στις αντιληπτικές χρωματικές ιδιότητες είναι το μοντέλο HLS (απόχρωση, φωτεινότητα, κορεσμός). Ορίζεται σε ένα διπλό εξα-κωνικό υποσύνολο

ενός κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων. Το χρωματικό μοντέλο HLS φαίνεται στο σχήμα 3.7.6. Η απόχρωση αναπαρίσταται από μία γωνία, της οποίας η τιμή είναι μηδενική για το κόκκινο χρώμα. Όταν το όριο του χρωματικού χώρου διατρέχεται με ανθρωπολογιακή φορά τα χρώματα εμφανίζονται με την ακόλουθη σειρά: κόκκινο, κίτρινο, πράσινο, κυανό, μπλε και ιώδες. Ο κορεσμός του γκριζου φωτός είναι $S = 0$. Ο μέγιστος κορεσμός εμφανίζεται στα χρώματα τα οποία έχουν $S = 1$ και $L = 0.5$.



Σχήμα 3.7.6: Καθορισμός του HLS χρωματικού χώρου.

Η σωστή απόκτηση των χρωματικών πληροφοριών είναι πολύ σημαντική στις γραφικές τέχνες, ιδιαίτερα για τη σάρωση και εκτύπωση έγχρωμων εικόνων (poster). Συνεπώς, η βαθμονόμηση του έγχρωμου σαρωτή και η χρωματική διόρθωση αποτελούν αντικείμενα έντονης έρευνας [KAN97]. Διάφορες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση, με κυρίαρχες τις παλινδρομικές μεθόδους, που ελαχιστοποιούν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MMSE) και τα νευρωνικά δίκτυα. Οι ίδιες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια εντελώς διαφορετική εφαρμογή, την χρωματική διόρθωση ψηφιοποιημένων παλαιών εικόνων



Σχήμα 3.7.7: Μη καθαρισμένη παλαιά εικόνα (αριστερό μέρος). Αποτέλεσμα της ψηφιακής χρωματικής διόρθωσης (δεξιό μέρος).

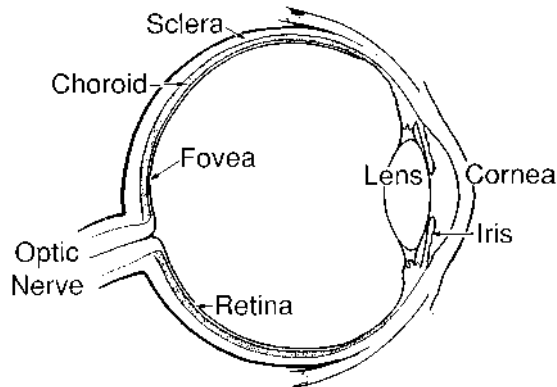
οι οποίες έχουν σκεπαστεί με σκόνη ή έχουν υποστεί αλλοιώσεις (π.χ. βερνίκι) εξαιτίας οξείδωσης. Ο «καθαρισμός» του ψηφιακού χρώματος θα μπορούσε να είναι μια σημαντική βοήθεια για την αποκατάσταση της εικόνας πριν από τον πραγματικό χημικό καθαρισμό. Αν υπάρχουν μικρά καθαρισμένα τμήματα, οι πληροφορίες τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ψηφιακή «διόρθωση» του χρώματος πριν τον χημικό καθαρισμό, με πολύ ελπιδοφόρα αποτελέσματα [PAP98], όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.7.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα το οποίο παρουσιάζεται στην επεξεργασία έγχρωμων εικόνων αποτελεί ο κβάντισμός έγχρωμων εικόνων [HEC82], [ORC90]. Σε μερικές περιπτώσεις (π.χ. σε μεγάλα διαφημιστικά πάνελ), η πραγματική απεικόνιση της έγχρωμης εικόνας δεν είναι εφικτή, εξαιτίας περιορισμών του υλικού. Σ' αυτή την περίπτωση η έγχρωμη εικόνα πρέπει να κβαντιστεί και να απεικονιστεί χρησιμοποιώντας έγχρωμες παλέτες (color palettes) περιορισμένου αριθμού χρωμάτων. Η κβάντιση του χρώματος παρέχει έγχρωμες παλέτες οι οποίες βελτιστοποιούν καθορισμένα κριτήρια, για παράδειγμα, ελαχιστοποιούν το λάθος απεικόνισης του χρώματος. Στην ουσία, η κβάντιση του χρώματος είναι κβάντιση διανυσμάτων που λαμβάνει χώρα στον τρισδιάστατο χρωματικό χώρο. Συνεπώς, οι προσαρμογές των τεχνικών κβάντισης διανυσμάτων που προέρχονται από τη συμπίεση της εικόνας (π.χ. ο αλγόριθμος LBG) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την έγχρωμη κβάντιση. Εναλλακτικά, οι εκπαιδευόμενοι διανυσματικοί κβαντιστές, (Learning Vector

Quantizers, LVQs) [ΚΟΗ97] και οι τροποποιήσεις τους [ΡΙΤ96] μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό.

3.8 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΟΡΑΣΗΣ

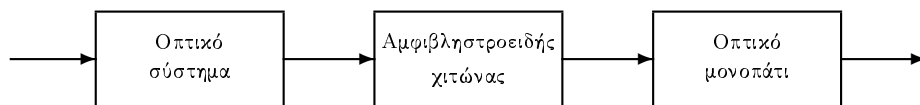
Σε πολλές εφαρμογές ο σκοπός της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας είναι η βελτίωση της ποιότητας της εικόνας, έτσι ώστε να είναι πιο ευχάριστη στον άνθρωπο ή να του δίνει περισσότερη ή πιστότερη πληροφορία. Για να πετύχουμε το σκοπό αυτό, πρέπει να έχουμε κατανοήσει καλά τη λειτουργία του ανθρώπινου ματιού και να έχουμε κατασκευάσει ένα μαθηματικό μοντέλο του. Βέβαια, η μοντελοποίηση της ανθρώπινης όρασης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, μιας και το ανθρώπινο μάτι έχει ιδιαίτερα πολύπλοκη δομή.



Σχήμα 3.8.1: Ανθρώπινο μάτι.

Μια εικόνα του ματιού φαίνεται στο σχήμα 3.8.1. Το μάτι είναι περίπου σφαιρικό και έχει διάμετρο περίπου 20mm. Το φως εισέρχεται στο μάτι από την κόρη της ίριδας. Η διάμετρος της ποικίλει από 2mm μέχρι 8mm, ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού. Το φως διαπερνά το φακό, που αποτελείται κατά 60-70% από νερό και είναι διαφανής, και προσπίπτει στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Αυτός αποτελείται από δύο ειδών ανιχνευτές φωτός: τα κωνία και τα ραβδία. Τα κωνία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στο χρώμα. Ο αριθμός τους είναι 6-7 εκατομμύρια και

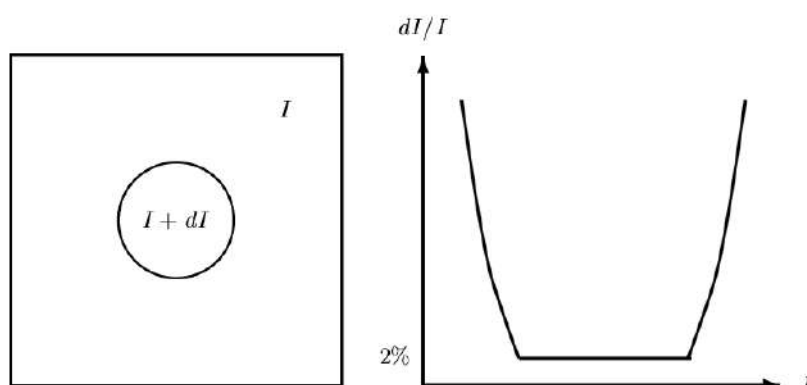
υπάρχουν κυρίως στο κεντρικό τμήμα του αμφιβληστροειδούς. Κάθε κωνίο συνδέεται με ένα νεύρο. Η όραση μέσω κωνίων ονομάζεται *όραση μεγάλης φωτεινότητας*. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε χαμηλά επίπεδα φωτεινότητας δεν αναγνωρίζουμε χρώματα. Τα ραβδία δίνουν μια γενική αντίληψη του οπτικού πεδίου. Είναι ευαίσθητα σε χαμηλούς φωτισμούς, αλλά δεν μπορούν να διακρίνουν χρωματικές αποχρώσεις. Για το λόγο αυτό τα ραβδία δίνουν την *όραση χαμηλής φωτεινότητας*. Ο αριθμός των ραβδίων είναι 75–150 εκατομμύρια και είναι διανεμημένα σε όλον τον αμφιβληστροειδή. Πολλά ραβδία συνδέονται σε μια νευρική απόληξη. Το γεγονός αυτό εξηγεί τη μικρή διακριτική ικανότητα στην όραση χαμηλής φωτεινότητας. Και τα ραβδία και τα κωνία μετατρέπουν την οπτική πληροφορία σε ηλεκτρική διέγερση η οποία μέσω του οπτικού νεύρου μεταφέρεται στον εγκέφαλο για παραπέρα επεξεργασία. Ήδη, όμως, μια πρώτη επεξεργασία γίνεται στον αμφιβληστροειδή και στο οπτικό νεύρο. Ένα πρώτο μοντέλο του ματιού, βασισμένο στην περιγραφή αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.8.2.



Σχήμα 3.8.2: Μοντέλο του ανθρώπινου ματιού.

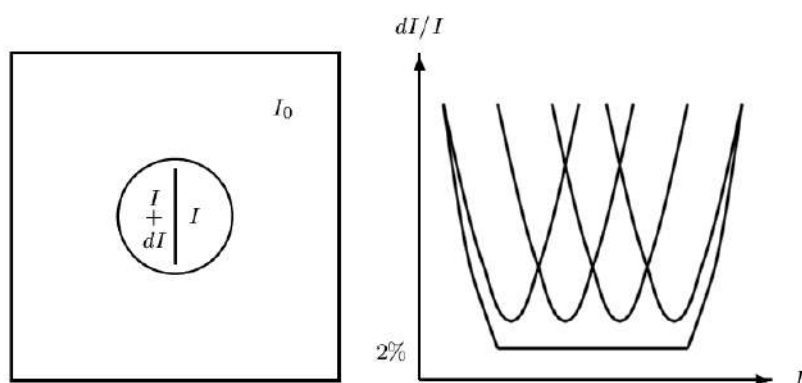
Η ανθρώπινη όραση είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Μόνο λίγα χαρακτηριστικά της έχουν μελετηθεί αναλυτικά. Ένα τέτοιο φαινόμενο που έχει σημασία για την τεχνητή όραση, είναι η ευαισθησία στην αντίθεση (contrast). Έστω μια εικόνα που αποτελείται από σταθερό φόντο φωτεινής έντασης I και από έναν παλμό έντασης $I + dI$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.3. Το dI αυξάνεται από 0 μέχρι να γίνει ο παλμός αισθητός. Ο λόγος dI/I ονομάζεται λόγος Weber και είναι σταθερός περίπου στο 2% για μεγάλη περιοχή φωτεινοτήτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.3.

Αν το πείραμα γίνει πιο πολύπλοκο, τα συμπεράσματα αλλάζουν. Έστω ότι έχουμε φόντο με φωτεινότητα I_0 και ότι έχουμε δύο γειτονικούς παλμούς με φωτεινότητες I και $I + dI$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.4. Ο λόγος dI/I δεν παραμένει πλέον σταθερός. Η περιβάλλουσα όμως του λόγου dI/I παραμένει και πάλι σταθερή για μεγάλη περιοχή



Σχήμα 3.8.3: Πείραμα για την εύρεση του λόγου Weber.

φωτεινότητων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.4. Ο λόγος Weber είναι



Σχήμα 3.8.4: Ο λόγος Weber για εικόνα με φόντο I_0 .

στην πραγματικότητα η παράγωγος του λογαρίθμου της φωτεινότητας:

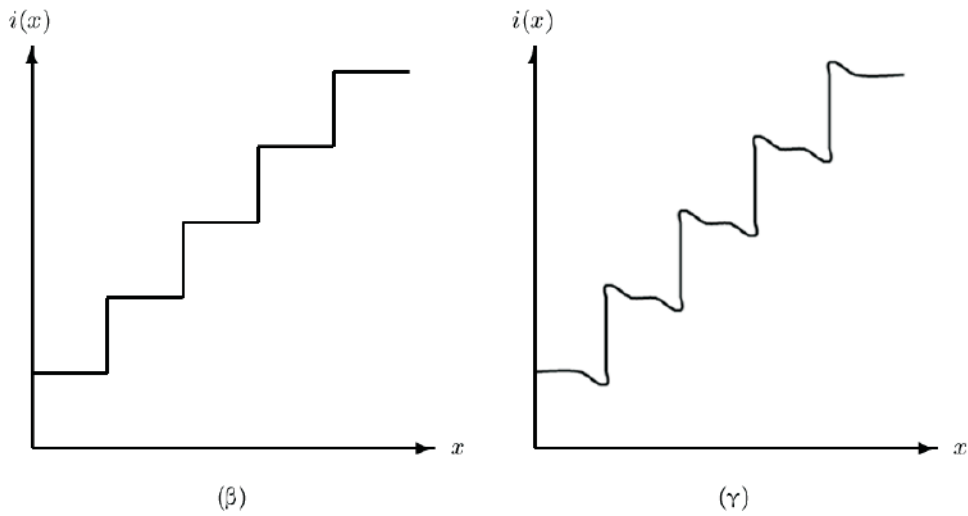
$$d[\log(I)] = \frac{dI}{I}. \quad (3.8.1)$$

Επομένως, ίδιες αλλαγές στο λογάριθμο της φωτεινότητας δημιουργούν ίδιες αντιληπτές διαφορές φωτεινότητας για μεγάλο εύρος φωτεινότητων. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι το ανθρώπινο μάτι εκτελεί έναν αναλογικό λογαριθμικό υπολογισμό.

Ένα άλλο φαινόμενο της ανθρώπινης όρασης που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο είναι το φαινόμενο *Mach*. Παρατηρήστε την εικόνα του σχήματος



(α)



(β)

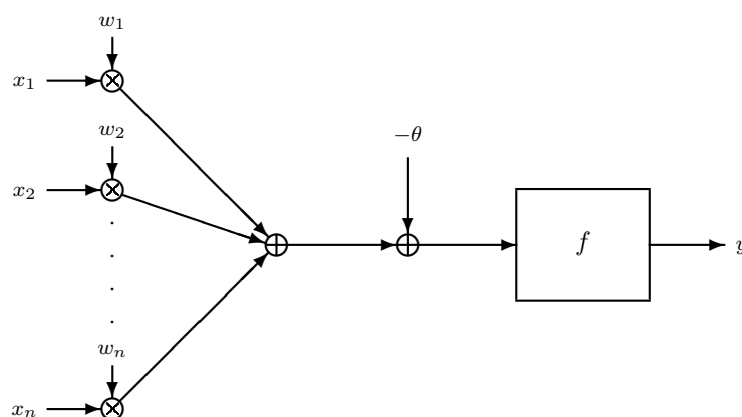
(γ)

Σχήμα 3.8.5: (α) Φαινόμενο Mach. (β) Πραγματικό προφίλ φωτεινότητας. (γ) Αντιληπτό προφίλ φωτεινότητας.

3.8.5α. Η εικόνα αποτελείται από στήλες διαφόρων τόνων του γκρι. Μας φαίνεται ότι κάθε στήλη δεν έχει σταθερή φωτεινότητα κατά την οριζόντια κατεύθυνση. Ωστόσο, η φωτεινότητα της κάθε στήλης είναι σταθερή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.5β. Όμως, το μάτι προσπαθεί να αυξήσει την αντίθεση μεταξύ των στηλών. Έτσι, αντιλαμβανόμαστε τη

φωτεινότητα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.5γ.

Το μάτι, λοιπόν, ενεργεί ουσιαστικά σαν ανωδιαβατό φίλτρο και πλουτίζει το συχνοτικό περιεχόμενο της εικόνας. Για το λόγο αυτό το μάτι είναι ευαίσθητο σε πληροφορίες υψηλού συχνοτικού περιεχομένου, π.χ. λεπτομέρειες, γραμμές, περιγράμματα και αντίθεση. Η λειτουργία αυτή του ανθρώπινου ματιού εξηγείται από τη φυσιολογία των νευρώνων του αμφιβληστροειδούς χιτώνα. Το μοντέλο του νευρώνα φαίνεται στο σχήμα 3.8.6. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:



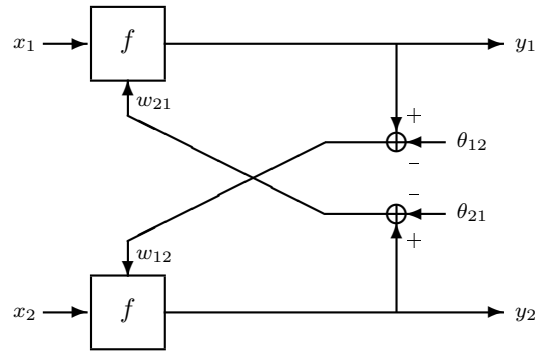
Σχήμα 3.8.6: Μοντέλο νευρώνα.

$$y = f \left(\sum_{j=1}^n w_j x_j - \theta \right), \quad (3.8.2)$$

όπου f είναι μια μονότονη συνάρτηση με κορεσμό στις μεγάλες θετικές και αρνητικές τιμές. Κλασσική εκλογή της συνάρτησης f είναι η συνάρτηση $\text{sign}(x)$:

$$f(x) = \text{sign}(x) = \begin{cases} -1 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0. \end{cases} \quad (3.8.3)$$

Το μοντέλο (3.8.2–3.8.3) ονομάζεται *μοντέλο McCulloch-Pitts*. Τα νεύρα διασυνδέονται μεταξύ τους και δημιουργούν ένα διδιάστατο πλέγμα. Ορισμένες νευρωνικές συνάψεις έχουν θετικά βάρη w_i , ενώ άλλες έχουν αρνητικά βάρη και ονομάζονται *αποτρεπτικές (inhibitory) συνάψεις*. Οι συνάψεις αυτές δημιουργούν τα ανωδιαβατά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου ματιού. Έστω δύο νευρώνες όπως φαίνονται στο σχήμα 3.8.7. Η



Σχήμα 3.8.7: Η διαδικασία ανάδρασης στο οπτικό νεύρο.

έξοδος του μοντέλου δίνεται από τις σχέσεις:

$$y_1 = \begin{cases} x_1 - w_{21}(y_2 - \theta_{21}) & y_2 \geq \theta_{21} \\ x_1 & y_2 < \theta_{21} \end{cases} \quad (3.8.4)$$

$$y_2 = \begin{cases} x_2 - w_{12}(y_1 - \theta_{12}) & y_1 \geq \theta_{12} \\ x_2 & y_1 < \theta_{12}. \end{cases} \quad (3.8.5)$$

Το μοντέλο αυτό μπορεί να γενικευθεί για ένα σύνολο νευρώνων με n εισόδους και n εξόδους:

$$y_i = \begin{cases} x_i - \sum_{j=1}^n w_{ji}(y_j - \theta_{ji}) & y_j \geq \theta_{ji} \\ x_i & y_j < \theta_{ji}. \end{cases} \quad (3.8.6)$$

Τα βάρη μπορούν να επιλεγούν ως εξής:

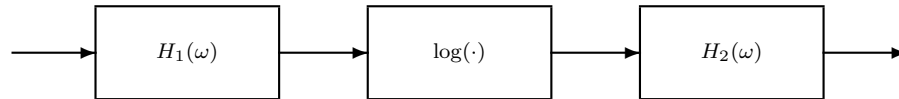
$$w_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ \alpha_0 \exp(-\alpha|i - j|) & i \neq j. \end{cases} \quad (3.8.7)$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι το δίκτυο των νευρώνων (3.8.6–3.8.7) δημιουργεί μια ανωδιαβατή συνάρτηση μεταφοράς της μορφής:

$$H_2(\omega) = \frac{\alpha^2 + \omega^2}{2\alpha_0\alpha + (1 - \alpha_0)(\alpha^2 + \omega^2)}. \quad (3.8.8)$$

Η ανωδιαβατή αυτή συνάρτηση εξηγεί το φαινόμενο Mach που περιγράφηκε νωρίτερα.

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση μπορούμε να οδηγηθούμε στο μαθηματικό μοντέλο της ανθρώπινης όρασης του σχήματος 3.8.8. Το



Σχήμα 3.8.8: Μαθηματικό μοντέλο του ματιού.

πρώτο τμήμα του μοντέλου περιγράφει το οπτικό σύστημα του ματιού. Το σύστημα αυτό είναι παθητικό και έχει ομοιογενή κατωδιαβατά χαρακτηριστικά. Η κρουστική απόκριση του συστήματος αυτού είναι της μορφής:

$$h_1(x) = \exp(-\alpha|x|), \quad (3.8.9)$$

όπου η παράμετρος α έχει τυπική τιμή 0.7 για διάμετρο κόρης 3mm. Η απόκριση συχνότητας του οπτικού συστήματος είναι κατωδιαβατή:

$$H_1(\omega) = \frac{2\alpha}{\alpha^2 + \omega^2}. \quad (3.8.10)$$

Η λογαριθμική συνάρτηση που χρησιμοποιείται στο μοντέλο εξηγεί ορισμένα φαινόμενα όπως αυτό της ευαισθησίας στην αντίθεση. Άλλες μη γραμμικότητες της μορφής x^γ έχουν επίσης προταθεί. Το τρίτο τμήμα του συστήματος περιλαμβάνει ένα ανωδιαβατό φίλτρο σαν αυτό της (3.8.8). Αν δεν υπήρχε το τμήμα αυτό θα βλέπαμε πολύ πιο θολά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.9.

Ερωτήσεις κατανόησης

1. Γιατί δε βλέπουμε χρώματα τη νύχτα;
2. Σε τι ωφελεί την ανθρώπινη όραση το φαινόμενο Mach;
3. Οι φακοί του ματιού αποτελούν κατωδιαβατό ή ανωδιαβατό σύστημα;
4. Γίνεται επεξεργασία εικόνας στον αμφιβληστροειδή/οπτικό νεύρο;



Σχήμα 3.8.9: (α) Αρχική εικόνα. (β) Αντιληπτή εικόνα χωρίς τα ανωδι-αβατά χαρακτηριστικά του ματιού.

3.9 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Στο πρόγραμμα MATLAB διαβάστε και εμφανίστε την εικόνα Lenna και εκτελέστε τις ακόλουθες ενέργειες:

- α. Προσθέστε κρουστικό θόρυβο με πυκνότητα 5%.
- β. Προσθέστε Γκαουσιανό θόρυβο μέσης τιμής 0 και διασποράς 0.1.
- γ. Προσθέστε πολλαπλασιαστικό θόρυβο διασποράς 0.1.

2. Με τη βοήθεια του MATLAB, διαβάστε και εμφανίστε την έγχρωμη εικόνα Lenna και εκτελέστε τις ακόλουθες ενέργειες:

- α. Μετασχηματίστε την έγχρωμη εικόνα από το χρωματικό μοντέλο RGB στο χρωματικό μοντέλο HSV και εμφανίστε την.
- β. Μετασχηματίστε την έγχρωμη εικόνα από το χρωματικό μοντέλο RGB στο χρωματικό μοντέλο NTSC και εμφανίστε την.
- γ. Μετασχηματίστε την έγχρωμη εικόνα σε ασπρόμαυρη και εμφανίστε την.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [COR70] T.N. Cornsweet, *Visual Perception*, Academic Press, New York, 1970.
- [HAR87] S. Harrington, *Computer graphics: A programming approach*, McGraw-Hill, 1987.
- [HEC82] P. Heckbert, *Color image quantization for frame buffer display*, *Computer Graphics*, 16(3):297–307, July 1982.
- [KAN97] H.R. Kang, *Color technology for electronic imaging devices*, SPIE, Cambridge, MA, 1997.
- [KOH97] T. Kohonen, *Self-organizing maps*, Springer Verlag, New York, 3rd edition, 1997.
- [LEE90] E.J. Breneman, H.C. Lee, C.P. Schutte, *Modeling light reflection for computer color vision*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(4):402–409, April 1990.
- [NIB86] W. Niblack, *Digital image processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986.
- [ORC90] M. Orchard, C. Bouman, *Color quantization of images*, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 39(12):2677–2690, December 1990.

- [PAP98] M. Pappas, I. Pitas, *Old painting digital color restoration*, In Proceedings 1998 NOBLESSE Workshop on Non-Linear Model Based Image Analysis (NMBIA'98), volume 73, pages 36–41, Glasgow, Scotland, July 1998.
- [PIT00] I. Pitas, “*Digital Image Processing Algorithms and Applications*”, Wiley Inter-Science, 2000.
- [PIT96] N. Nikolaidis, R. Yang, I. Pitas, C. Kotropoulos, M. Gabbouj, *Order statistics learning vector quantizer*, IEEE Transactions on Image Processing, 5(6):1048–1053, June 1996.
- [PRA91] W.K. Pratt, *Digital image processing*, John Wiley and Sons, 1991.
- [SITE94] Scientific Imaging Technologies. *An introduction to Scientific Imaging Charge-Coupled Devices*, Scientific Imaging Technologies, 1994.
- [WIT05] P.J. Withagen, F.C.A. Groen, K. Schutte, *CCD characterization for a range of color cameras*, Proc. Instrumentation and Measurement Technology, IMTC 2005, Ottawa, Canada, 17-19/5/2005.
- [WYZ00] G. Wyzecki, W.S. Stiles, “*Color science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*”, Wiley, 2000.