

Κεφάλαιο 2:

Αλγόριθμοι απόδοσης

Εισαγωγή

Για τους περισσότερους χρήστες, η γραφική με υπολογιστές είναι συνώνυμη με την απόδοση στιγμιotypών του κόσμου που μας περιβάλλει με τρόπο τέτοιο που, κατά το δυνατό, να ξεγελάει το ανθρώπινο μάτι και να κάνει το θεατή να πιστεύει ότι βλέπει μια φωτογραφία. Τέτοιες εικόνες, που ονομάζονται φωτορεαλιστικές, είναι πολύ δύσκολο να παραχθούν με τεχνικές όπως η σκίαση Gouraud ή το z-buffering, κι αυτό γιατί αυτές οι τεχνικές δε λαμβάνουν υπόψη τους τα φυσικά φαινόμενα που έχουν σχέση με το φως και τις ιδιότητές του: στο χώρο που ζούμε, τα αντικείμενα που φωτίζονται δημιουργούν σκιές και τα περισσότερα από αυτά ανακλούν μέρος της φωτεινής ακτινοβολίας που πέφτει πάνω τους. Επίσης, κάποια αντικείμενα είναι τελείως ή σχεδόν διαφανή, κάποια επιτρέπουν στο φως να διαχυθεί μέσα του, ενώ κάποια άλλα απορροφούν τη φωτεινή ακτινοβολία και εκπέμπουν τη δική τους στο χώρο. Γίνεται προφανές λοιπόν ότι οποιαδήποτε προσπάθεια δημιουργίας φωτορεαλιστικών γραφικών πρέπει να λαμβάνει υπόψη της πολύ σοβαρά τη φύση και τη συμπεριφορά της φωτεινής ενέργειας.

Η πιο διαδεδομένη από αυτές τις τεχνικές είναι το ray tracing (ανίχνευση ακτίνας), τεχνική που αρχικά αναπτύχθηκε για την αφαίρεση κρυμμένων επιφανειών, αλλά επεκτάθηκε και στην κάλυψη της σκίασης, ανάκλασης και διάθλασης. Αυτή η τεχνική

δεν αποτελεί την τελευταία λέξη στο φωτορεαλισμό, μια που και αυτή έχει τις αδυναμίες της, αλλά συνδυαζόμενη με άλλες μεθόδους απόδοσης και επεξεργασίας εικόνας μπορεί να δώσει εκπληκτικά αποτελέσματα. Το κυριότερο μειονέκτημα της ανίχνευσης ακτίνας είναι η ταχύτητα απόδοσης: μια πολύπλοκη σκηνή μπορεί να χρειαστεί πολλές ώρες για την απόδοση σε έναν υπερυπολογιστή, ενώ η ίδια διαδικασία μπορεί να απαιτήσει μέρες, ακόμα και σε έναν πολύ δυνατό προσωπικό υπολογιστή.

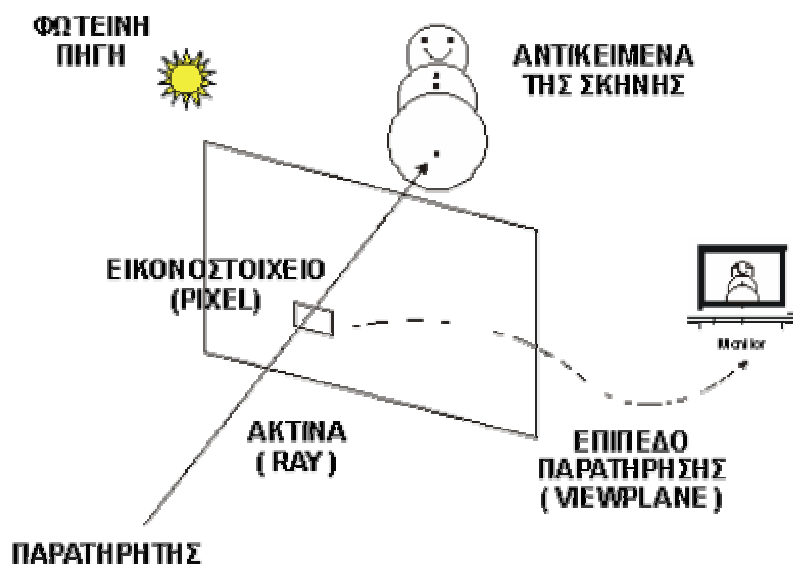
Ο δεύτερος αλγόριθμος υπολογισμού γενικού φωτισμού είναι ο αλγόριθμος ακτινοβολίας (radiosity), στον οποίο σε αντίθεση με την ανίχνευση ακτίνας δεν υπολογίζεται ο φωτισμός μόνο για να αποδοθεί η εικόνα, αλλά αναλυτικά με βάση το πώς διαχέεται το φως μέσα σε μια σκηνή. Έτσι, αρκεί να υπολογίσουμε τη συνεισφορά της φωτεινής ακτινοβολίας μόνο μία φορά, αφού μπορούμε να ξαναχρησιμοποιήσουμε αυτά τα αποτελέσματα για να δούμε τη σκηνή μας από οποιαδήποτε οπτική γωνία, αν δεν αλλάξουν οι φωτεινές πηγές ή η θέση και τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων μας.

Ανίχνευση ακτίνας

Φυσικό μοντέλο

Η ανίχνευση ακτίνας στηρίζεται σε μια πολύπλοκη μαθηματικά, αλλά πολύ απλή στην κατανόηση προσέγγιση, την προσομοίωση ακτινών φωτός στον τρισδιάστατο χώρο. Για να γίνει κατανοητή αυτή η προσέγγιση πρέπει να λάβουμε υπόψη μας κάποια στοιχεία οπτικής, καθώς και διάφορους τρόπους αναπαράστασης αντικειμένων στο χώρο. Αρχικά, περιγράφουμε μια σκηνή σαν ένα σύνολο από αντικείμενα (objects) και φωτεινές πηγές (light sources). Τα αντικείμενα μπορεί να είναι απλά σχήματα στο χώρο - σφαίρες, πολύγωνα, κ.α. - ενώ οι φωτεινές πηγές είναι απλά σημεία του χώρου που ακτινοβολούν φως προς όλες τις κατευθύνσεις και στην ίδια ένταση. Κατά σύμβαση ορίζουμε τα αντικείμενα να μην εκπέμπουν δικό τους φως και τις φωτεινές πηγές να μην είναι ποτέ απευθείας ορατές, αν και η τελευταία παραδοχή μπορεί να παρακαμφθεί σε πιο πολύπλοκους ανιχνευτές. Η θεώρηση του τρισδιάστατου χώρου γίνεται από ένα σημείο που ονομάζεται παρατηρητής (eye) και διαμέσου ενός ορθογώνιου επιπέδου παρατήρησης (view plane). Η εικόνα στο επίπεδο παρατήρησης είναι αυτή που τελικά θα εμφανιστεί και

στην οθόνη του υπολογιστή - επομένως υπάρχει μια άμεση εξάρτηση των σημείων στο επίπεδο παρατήρησης και των σημείων της οθόνης. Η πιο απλή υλοποίηση ενός αλγορίθμου ανίχνευσης ακτίνας για τη δημιουργία μιας εικόνας είναι να ακολουθήσουμε τα φωτεινά σωματίδια (φωτόνια) στη διαδρομή τους από τις φωτεινές πηγές προ τα διάφορα αντικείμενα – αυτή η διαδικασία ονομάζεται ευθεία ανίχνευση ακτίνας (forward ray tracing). Η τεχνική όμως αυτή δεν είναι ιδιαίτερα πρακτική. Ας υποθέσουμε, για παράδειγμα, πως μια ακτίνα ξεκινά από μια φωτεινή πηγή, χτυπά σε μια γυαλιστερή σφαίρα και καταλήγει στον παρατηρητή, δια μέσου του επιπέδου παρατήρησης. Σε αυτήν την περίπτωση, το συγκεκριμένο σημείο της σφαίρας θα γίνει τελικά ορατό. Γενικά, ότι φαίνεται στην τελική εικόνα είναι τα σημεία εκείνα των αντικειμένων που είναι πάνω στη γραμμή που ξεκινά από τον παρατηρητή και περνά από το αντίστοιχο σημείο του επιπέδου παρατήρησης. Αν στην πραγματικότητα ανιχνεύαμε το φως που εκπέμπουν οι φωτεινές πηγές θα διαπιστώναμε πως η ζητούμενη εικόνα θα αργούσε να εμφανιστεί, και αυτό γιατί πάρα πολλές ακτίνες δεν περνούν από το επίπεδο παρατήρησης με συνέπεια να μη συνεισφέρουν καθόλου στην τελική εικόνα.



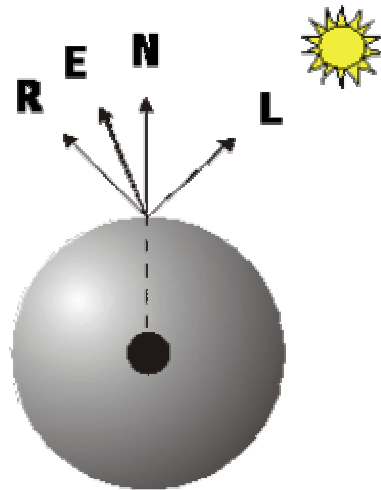
Εικόνα 1: Ένα τυπικό περιβάλλον ανίχνευσης ακτίνας

Γι' αυτό λοιπόν ακολουθούμε μια πιο ρεαλιστική πρακτική αντιστρέφοντας τη διαδικασία. Για παράδειγμα, αν επιλέξουμε ένα σημείο του επιπέδου παρατήρησης γνωρίζουμε πως κάθε αντικείμενο που είναι ορατό σε αυτό το σημείο βρίσκεται πάνω στη γραμμή που ενώνει τον παρατηρητή και το σημείο του επιπέδου παρατήρησης. Έτσι δημιουργούμε μια ακτίνα παρατήρησης (eye ray), που ξεκινά από τον παρατηρητή, περνά από

το επίπεδο παρατήρησης και κατευθύνεται προ της σκηνής που δημιουργήσαμε. Το πρώτο αντικείμενο με το οποίο θα διασταυρωθεί η ακτίνα θα είναι ορατό κι επομένως θα πρέπει να παρουσιαστεί στο αντίστοιχο σημείο της οθόνης. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αντεστραμμένη ανίχνευση ακτίνας (reverse ray tracing) γιατί ακριβώς ακολουθούμε τις ακτίνες από τον παρατηρητή πίσω προς τη σκηνή μας. Θεωρούμε λοιπόν πως η οθόνη του υπολογιστή είναι ουσιαστικά ένα ορθογώνιο πλέγμα από εικονοστοιχεία (pixels) και ο σκοπός μας είναι να καθορίσουμε το σωστό χρώμα για κάθε ένα από αυτά. Για να γίνει αυτό, ας υποθέσουμε αρχικά πως το πρώτο αντικείμενο που συναντά η ακτίνα είναι μια λευκή σφαίρα και ας ονομάσουμε \mathbf{P} το σημείο που έγινε η διασταύρωση (point of intersection). Θέλουμε λοιπόν να καθορίσουμε το χρώμα του φωτός που φεύγει από το \mathbf{P} και πηγαίνει στον παρατηρητή, ακολουθώντας την αντίστροφη διαδρομή από εκείνη της ακτίνας. Αν θυμηθούμε πως τα αντικείμενα δεν εκπέμπουν δικό τους φως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το χρώμα που φάχνουμε εξαρτάται πλήρως από τις φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν στο σημείο \mathbf{P} (incident light) και που ανήκουν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: αυτές που ανακλώνται από την επιφάνεια (reflected light) και αυτές που τελικά μεταδίδονται δια μέσου της (transmitted light). Κάθε ένας από αυτούς τους τύπους συμπεριφέρεται διαφορετικά συναντώντας την επιφάνεια, είτε με σημειακή ανάκλαση, είτε με διάχυση. Η σημειακή ανάκλαση μοιάζει με τον τρόπο που μια μπάλα αναπηδά σε μια τελείως λεία επιφάνεια, η γωνία δηλαδή αναπήδησης της μπάλας εξαρτάται μόνο από τη γωνία πρόσπτωσης, ενώ η διάχυση μοιάζει με την αναπήδηση σε μια αρκετά ανώμαλη επιφάνεια: δεν είναι σίγουρο προς ποια κατεύθυνση θα αναπηδάει η μπάλα, ενώ διαδοχικές αναπηδήσεις στο ίδιο σημείο θα έχουν διαφορετικά αποτελέσματα. Το φως λοιπόν μπορεί να συμπεριφερθεί με τέσσερις τρόπους συναντώντας μια επιφάνεια : ανάκλαση και μετάδοση, σημειακή ή με διάχυση. Η φωτεινή ακτινοβολία αυτή μπορεί να προέρχεται είτε από φωτεινές πηγές, είτε από ακτίνες που συνάντησαν κάποιο άλλο αντικείμενο και έφτασαν στο σημείο πρόσπτωσης. Έτσι τελικά έχουμε οκτώ διαφορετικά ενδεχόμενα να λάβουμε υπόψη μας για να αποφασίσουμε για το χρώμα του εικονοστοιχείου. Όμως τις περισσότερες φορές δε χρειάζεται να τα υπολογίσουμε όλα, γεγονός πολύ ελαφρυντικό, αφού έστω και δύο από τους παραπάνω παράγοντες έχουν μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΥΣΑ ΑΚΤΙΝΑ

ΦΩΤΕΙΝΗ ΠΗΓΗ



Εικόνα 2: Προσπίπτουσα και ανακλώμενες ακτίνες

Ας εξετάσουμε πρώτα τις ακτίνες που προέρχονται από τις φωτεινές πηγές. Αρχικά πρέπει να ερευνήσουμε από ποιες συγκεκριμένες πηγές προέρχεται το φως που φτάνει στο σημείο **P**: για να γίνει αυτό λαμβάνουμε υπόψη μας το γεγονός ότι αν η φωτεινή πηγή **S**, ή πιο σωστά ένας παρατηρητής στο σημείο που βρίσκεται η πηγή **S**, μπορεί να «δει» και άρα να φωτίσει το σημείο **P**, τότε και το σημείο **P** μπορεί να δει την πηγή **S**. Για να διαπιστώσουμε αν συμβαίνει αυτό στέλνουμε μια νέα ακτίνα την ακτίνα σιάς (shadow ray) με αρχή το σημείο **P** και με κατεύθυνση προς την πηγή **S**. Αν η ακτίνα σιάς φτάσει στο **S** χωρίς να συναντήσει ενδιάμεσα άλλο αντικείμενο, τότε φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι το **P** φωτίζεται από την **S** και επομένως πρέπει να βρούμε ποιο ποσοστό της φωτεινής ακτινοβολία της **S** φτάνει τελικά στο **P**. Αντίθετα, αν η ακτίνα σιάς συναντήσει κάποιο αδιαφανές αντικείμενο, τότε θεωρούμε ότι το **P** βρίσκεται στη σιά όσον αφορά την πηγή **S** και κατά συνέπεια την αγνοούμε. Έστω τώρα ότι διαπιστώνουμε πως το σημείο **P** φωτίζεται από τη φωτεινή πηγή **S** – το επόμενο βήμα είναι να διαμορφώσουμε ένα, έστω και προσεγγιστικό, μοντέλο σίασης (shading model). Κάθε σημείο της επιφάνειας των περισσότερων αντικειμένων, άρα και της σφαίρας του παραδειγμάτος μας, συνοδεύεται από ένα αντίστοιχο μοναδιαίο διάνυσμα (surface normal), που είναι κάθετο στο επίπεδο που εφάπτεται στο **P** και κατευθύνεται μακριά από την επιφάνεια. Στη σφαίρα, τα μοναδιαία διανύσματα βρίσκονται πάνω στη διεύθυνση που ενώνει το κέντρο της σφαίρας με το συγκεκριμένο σημείο. Ας ονομάσουμε **N** το μονα-

διαίο διάνυσμα στο \mathbf{P} και ας δημιουργήσουμε ένα άλλο διάνυσμα \mathbf{L} , που επίσης ξεκινά από το \mathbf{P} και κατευθύνεται προς την πηγή \mathbf{S} , που τη θεωρούμε να έχει φωτεινότητα I . Αν η \mathbf{S} βρίσκεται μέσα στη σφαίρα, το φως θα μεταδίδεται διαμέσου τη επιφάνειάς της, αλλιώς θα ανακλάται πάνω της. Για να βρούμε τι από τα δύο ισχύει υπολογίζουμε το γινόμενο $\mathbf{N}\cdot\mathbf{L}$: αν είναι θετικό τότε η \mathbf{S} είναι έξω από την επιφάνεια, ενώ αν είναι αρνητικό τότε η \mathbf{S} είναι μέσα σε αυτήν. Στην περίπτωση που $\mathbf{N}\cdot\mathbf{L}=0$, τότε η \mathbf{S} βρίσκεται πάνω στο επίπεδο που εφάπτεται στη σφαίρα και επομένως δε φωτίζει καθόλου το σημείο \mathbf{P} . Ας υποθέσουμε για το παράδειγμά μας, ότι $\mathbf{N}\cdot\mathbf{L}>0$ και επομένως το φως ανακλάται από την επιφάνεια. Το φως που ανακλάται με διάχυση (DR) είναι το ίδιο προς όλες τις κατευθύνσεις και για αυτό ισχύει $DR = I * (\mathbf{N}\cdot\mathbf{L})$, που σημαίνει πως η ένταση του DR δίνεται από την ένταση της φωτεινής πηγής μεγεθυμένη κατά τον παράγοντα $\mathbf{N}\cdot\mathbf{L}$ (νόμος του Lambert). Το φως που τελικά θα ανακλαστεί σημειακά προς τον παρατηρητή θα δημιουργήσει μια σημειακή φωτεινότητα (highlight) που είναι η ανάκλαση του φωτός που εκπέμπει η πηγή πάνω στην επιφάνεια. Δημιουργούμε τώρα ένα νέο διάνυσμα \mathbf{E} , που ξεκινά από το \mathbf{P} και κατευθύνεται πίσω στον παρατηρητή. Αφού το \mathbf{L} δείχνει προς την πηγή \mathbf{S} , θα ισχύει $\mathbf{R} = 2\cdot\mathbf{N}\cdot\mathbf{d} - \mathbf{L}$, όπου $\mathbf{d} = \mathbf{N}\cdot\mathbf{L}$ και η διεύθυνση του \mathbf{R} είναι η διεύθυνση του ανακλώμενου φωτός. Μπορούμε τώρα εύκολα να βρούμε την ποσότητα αυτού του φωτός που φτάνει στον παρατηρητή, βρίσκοντας τη σχετική θέση του \mathbf{R} και του \mathbf{E} , που δίνεται από το γινόμενο $\mathbf{R}\cdot\mathbf{E}$. Συχνά υψώνουμε αυτό το γινόμενο σε κάποια δύναμη – όσο μεγαλύτερος είναι ο εκθέτης, τόσο εντονότερη είναι η σημειακή φωτεινότητα, δίνοντας έτσι κάποια αίσθηση της τραχύτητας της επιφάνειας. Τελικά,

$$SR = I * [(\mathbf{E}\cdot\mathbf{R})^k]$$

όπου SR είναι το σημειακά ανακλώμενο φως και το k ελέγχει την τραχύτητα της επιφάνειας. Παρόμοιες υποθέσεις μπορούμε να κάνουμε και για τη μετάδοση του φωτός διαμέσου των επιφανειών. Η μόνη διαφορά είναι ένας παράγοντας διόρθωσης που πρέπει να υπολογίσουμε εξαιτίας της διάθλασης του φωτός μέσα στο αντικείμενο. Συνοπτικά θα αναφέρουμε πως το μέγεθος της διάθλασης εξαρτάται από τους αντίστοιχους δείκτες διάθλασης των δύο σωμάτων n_1, n_2 (εκείνου από το οποίο ξεκινά η φωτεινή ακτίνα και αυτού που τελικά διασχίζει), καθώς και από το μή-

κος κύματος του φωτός, μέγεθος που εδώ θα αγνοήσουμε. Τελικά για το φως που μεταδίδεται ισχύει

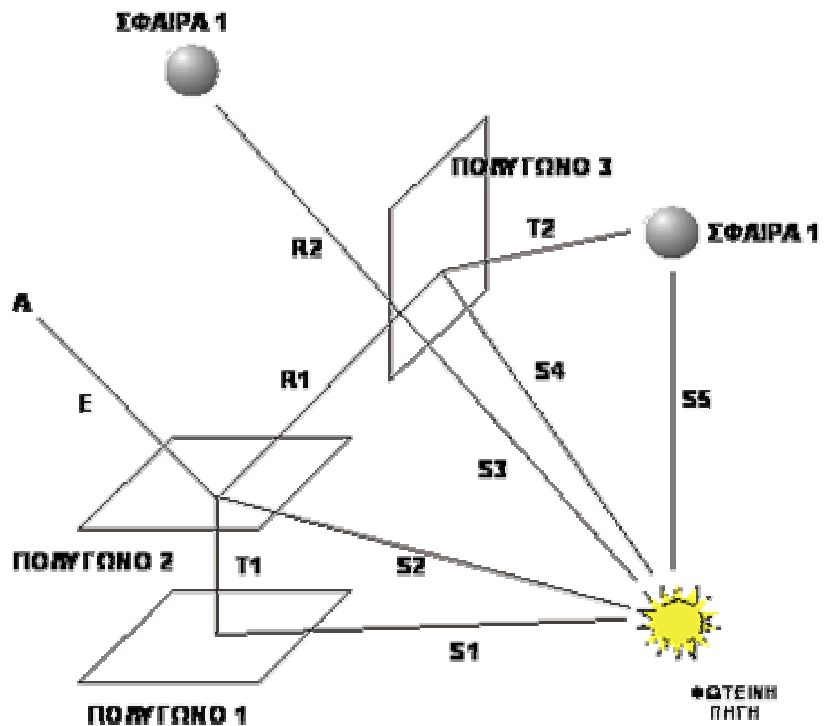
$$\mathbf{T} = \eta_{12} * \mathbf{V} + (\eta_{12} * C - \text{SQR}(1 + \eta_{12} * (C^2 - 1))) * \mathbf{N}$$

όπου \mathbf{N} το μοναδιαίο διάνυσμα στο \mathbf{P} , \mathbf{V} το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατεύθυνση που προσπίπτει το φως, $C = -\mathbf{V} \cdot \mathbf{N}$ και $\eta_{12} = \eta_1 / \eta_2$. Είναι δυνατό η υπόρριζη ποσότητα να είναι και αρνητική, οπότε η τετραγωνική ρίζα δεν έχει εδώ νόημα - σε αυτή την περίπτωση έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση (total internal reflection), ενώ γενικά το διάνυσμα \mathbf{T} που προκύπτει δεν έχει πάντα μέτρο τη μονάδα.

Το επόμενο βήμα είναι να ανιχνεύσουμε τις φωτεινές ακτίνες που τυχόν προέρχονται από άλλα αντικείμενα ή φωτεινές πηγές. Ας υποθέσουμε και πάλι πως με την ακτίνα παρατήρησης συναντήσαμε μια λευκή σφαίρα στο σημείο \mathbf{P} της επιφάνειάς της. Γνωρίζουμε ήδη πως η ακτίνα που ανακλάται σημειακά προς το \mathbf{E} έρχεται από τη διεύθυνση $\mathbf{R}' = 2\mathbf{N} * (\mathbf{E} \cdot \mathbf{N}) - \mathbf{E}$, όπου εδώ χρησιμοποιήσαμε το \mathbf{R}' για να δείξουμε ότι αυτό το διάνυσμα κατευθύνεται αντίθετα από την κατεύθυνση που έρχεται το φως. Το πρόβλημα λοιπόν τώρα μετατίθεται στο να υπολογίσουμε ακριβώς το φως που προσπίπτει στο \mathbf{P} κατά τη διεύθυνσή του \mathbf{R}' . Ο τρόπος που φτάνουμε στην απάντηση είναι το "μυστικό" της αντεστραμμένης ανίχνευσης ακτίνας: για να υπολογίσουμε το φως που έρχεται στη διεύθυνση του \mathbf{R}' υποθέτουμε πως το \mathbf{R}' είναι μια ακτίνα παρατήρησης και εξετάζουμε ποιο αντικείμενο συναντά πρώτο - όταν βρούμε το χρώμα του φωτός που ανακλάται από αυτό το αντικείμενο στη διεύθυνση της ακτίνας παρατήρησης (που είναι η \mathbf{R}') τότε θα έχουμε βρει και το χρώμα του φωτός που φτάνει στο \mathbf{P} στη διεύθυνση του \mathbf{R}' .

Γίνεται προφανές λοιπόν πως η όλη διαδικασία είναι αναδρομική. Για να βρούμε το χρώμα του ανακλώμενου φωτός βρίσκουμε το πρώτο αντικείμενο που αυτό φωτίζει και κατόπιν το χρώμα του φωτός που ανακλάται από αυτό το αντικείμενο - το χρώμα αυτό είναι ένας συνδυασμός του φωτός που φτάνει απευθείας από τις φωτεινές πηγές και εκείνου που το αντικείμενο ανακλά ή μεταδίδει και βρίσκεται με την μέθοδο που περιγράψαμε: αν κατασκευάσουμε την ακτίνα \mathbf{T}' σε αντιστοιχία με την \mathbf{R}' (η \mathbf{T}' είναι για την \mathbf{T} ότι και η \mathbf{R}' για την \mathbf{R}), τη χρησιμοποιούμε σαν ακτίνα παρατήρησης και υπολογίζουμε το τελικό αποτέλεσμα. Έτσι τελικά φτάνουμε σε ένα δένδρο ακτινών (ray tree): η ακτίνα παρατήρησης συναντά ένα αντικείμενο και εκπέμπει ακτίνες σιας

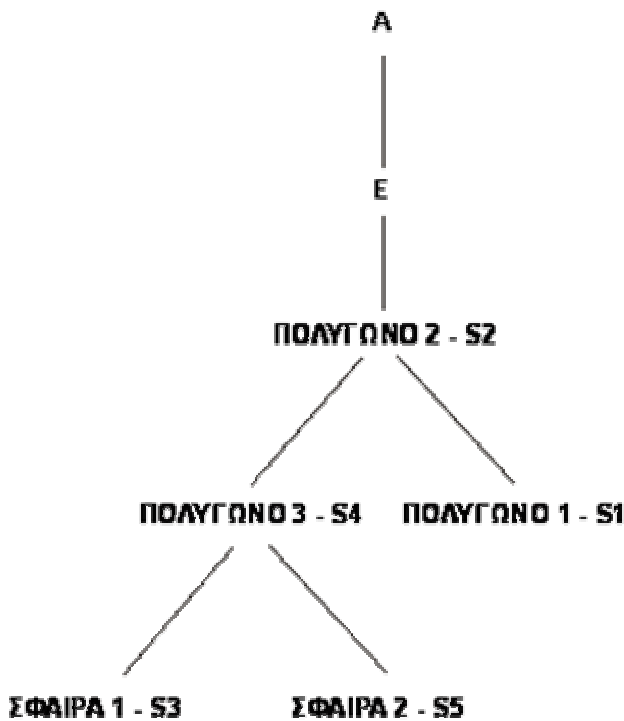
προς τις φωτεινές πηγές για να καθορίσει τον απευθείας φωτισμό και ακτίνες ανάκλασης και μετάδοσης για να βρει το φως που ανακλάται σημειακά ή μεταδίδεται από αυτό το αντικείμενο. Καθεμιά από αυτές τις δύο ακτίνες συναντά ένα αντικείμενο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Μια συνηθισμένη τεχνική σε προγράμματα ανίχνευσης ακτίνας είναι να σταματάμε την αναδρομή σε κάποιο προκαθορισμένο βάθος, γεγονός που δεν παράγει ακριβείς εικόνες, αλλά αν τα αντικείμενα δεν είναι ιδιαίτερα γυαλιστερά ή διαφανή το αποτέλεσμα είναι ένα ικανοποιητικό πρώτο βήμα.



Εικόνα 3: Αναδρομικός υπολογισμός της φωτεινής ακτινοβολίας

Αφού κατασκευάσουμε το δένδρο, αρχίζουμε να υπολογίζουμε τα διαδοχικά χρώματα από τα κλαδιά προ τη ρίζα. Στα αντικείμενα στις θέσεις – κλαδιά του δένδρου τα χρώματα οφείλονται εξ ολοκλήρου στις φωτεινές πηγές. Αυτά τα χρώματα λειτουργούν σαν ανακλώμενα ή μεταδιδόμενα χρώματα για τα επόμενα αντικείμενα κι αυτό συνεχίζεται μέχρι να φτάσουμε να υπολογίσουμε το χρώμα του E. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε πως ουσιαστικά αγνοούμε το φως που ανακλάται ή μεταδίδεται με διάχυση από τα άλλα αντικείμενα. Σε αρκετά προγράμματα ανίχνευσης ακτίνας προστίθεται ένα μικρό ποσό σταθερής ακτινοβολία διάχυτου φωτός (ambient light) για να ισοσκελίσει αυτήν την παραδοχή. Ένα άλλο φαινόμενο που δεν εξετάσαμε είναι το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Παρατηρούμε πως ο υπολογισμός του T' περιλαμβάνει και τον υπολογισμό μιας

τετραγωνικής ρίζα – αν η υπόρριζη ποσότητα γίνει αρνητική, το T' γίνεται μιγαδικό. Η φυσική σημασία αυτού του αποτελέσματος είναι πως το φως δε μεταδίδεται καθόλου διαμέσου της επιφάνειας, αλλά ανακλάται πλήρως από αυτήν. Για κάθε γωνία μικρότερη από την κρίσιμη γωνία όπου η υπόρριζη ποσότητα γίνεται αρνητική ή μηδέν, το φως μεταδίδεται, ενώ για μεγαλύτερες γωνίες το φως ανακλάται σημειακά από το εσωτερικό της επιφάνειας. Μπορούμε να παρατηρήσουμε αυτό το φαινόμενο αν βουτήξουμε ένα αντικείμενο στο νερό: αν κοιτάξουμε προσεκτικά κάτω από την επιφάνεια του νερού θα δούμε πως το αντικείμενο φαίνεται να εξαφανίζεται. Αυτό συμβαίνει γιατί οι φωτεινές ακτίνες κοντά στην επιφάνεια φτάνουν στο όριο ανάμεσα στον αέρα και το νερό σε πολύ οξεία γωνία και ανακλώνται ξανά μέσα σε αυτό, αντί να μεταδοθούν προ τον αέρα. Αυτή είναι και η αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών : είναι διαφανείς ώστε να επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός, αλλά είναι σχεδιασμένες με ελάχιστο πάχος έτσι ώστε οι φωτεινές ακτίνες που συναντούν τα τοιχώματα του εσωτερικού να ανακλώνται μέσα στο κυρίως σώμα της ίνας αντί να μεταδίδονται προς τα έξω.

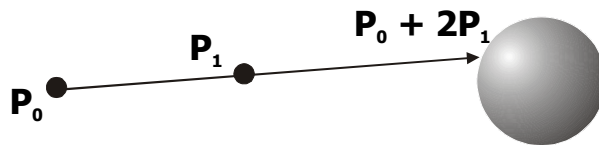


Εικόνα 4: Ένα δένδρο που δημιουργείται κατά την ανίχνευση ακτίνας

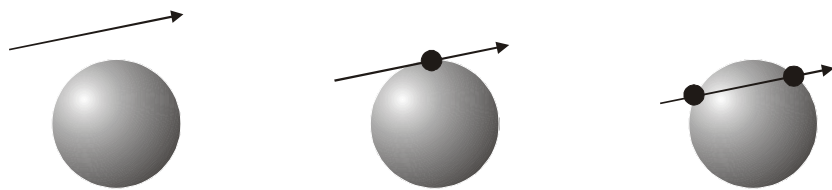
Υπολογισμός διασταυρώσεων (intersections)

Ένα από τα σημαντικότερα και πιο χρονοβόρα προβλήματα στην ανίχνευση ακτίνας είναι ο υπολογισμός των διασταυρώσεων των διάφορων ακτινών με τα αντικείμενα. Η πιο άμεση αντιμε-

τώπιση είναι να υπολογίσουμε τις τυχόν διασταυρώσεις κάθε ακτίνας με κάθε αντικείμενο και μετά να βρούμε το αντικείμενο για το οποίο η διασταύρωση έγινε πλησιέστερα στον παρατηρητή. Αυτή η μέθοδος δείχνει κουραστική, αλλά δουλεύει σωστά. Έστω ότι θέλουμε να βρούμε τις διασταυρώσεις μιας ακτίνας που αρχίζει στο σημείο P_0 και έχει διεύθυνση P_1 , με μια σφαίρα κέντρου C και ακτίνας r .



Εικόνα 5: Περιπτώσεις διασταυρώσεων ενός αντικειμένου και μιας ακτίνας



Όπως γνωρίζουμε κάθε σημείο της ακτίνας ικανοποιεί τη σχέση $P = P_0 + P_1 t$, για κάποια πραγματική τιμή του t που εδώ ονομάζεται παράμετρο ακτίνας (ray parameter) και κάθε σημείο Q της επιφάνειας της σφαίρας τη σχέση $(Q - C) \cdot (Q - C) - r^2 = 0$. Αφού ενδιαφερόμαστε μόνο για σημεία στην επιφάνεια της σφαίρας, το t θα παίρνει μόνο θετικές τιμές. Αν η ακτίνα διασταυρώνεται με τη σφαίρα, τότε κάποιο σημείο Q θα βρίσκεται και πάνω στην ακτίνα και πάνω στη σφαίρα, οπότε θα ικανοποιεί τις δύο εξισώσεις: $Q = P_0 + P_1 t$ και $(Q - C) \cdot (Q - C) - r^2 = 0$. Για να επιλύσουμε αυτό το σύστημα και να βρούμε τα διάφορα Q αντικαθιστούμε την πρώτη στη δεύτερη και έχουμε:

$$(P_0 + P_1 t) \cdot (P_0 + P_1 t) - r^2 = 0.$$

Αν τώρα λύσουμε ως προς t θα προκύψει ένα τριώνυμο της μορφής $at^2 + bt + c = 0$, όπου $a = P_1 \cdot P_1$, $b = 2P_1 \cdot C - C \cdot C - r^2$ και $G = P_0 - C$. Ο αριθμός των λύσεων του τριωνύμου εξαρτάται από το πρόσημο της διακρίνουσας $d = b^2 - 4ac$. Αν είναι $d < 0$, η ακτίνα δε διασταυρώνεται καθόλου με τη σφαίρα, ενώ αν $d = 0$ η ακτίνα εφάπτεται σε ένα σημείο της σφαίρας. Αν τώρα η διακρίνουσα είναι θετική, η ακτίνα διαπερνά τη σφαίρα σε δύο σημεία, τα οποία δίνονται από τη σχέση $P = P_0 + P_1 t$, για κάποιες συγκεκριμένες τιμές του t . Από τα δύο αυτά σημεία θέλουμε το πλησιέστερο στον παρατηρητή, το οποίο δίνεται από

τη μικρότερη από τις δύο τιμές του t , εφόσον αυτή είναι θετική. Αν κάποια από αυτές – ή και οι δύο – είναι αρνητική, τότε αντιστοιχεί σε σημεία διασταύρωσης πίσω από το σημείο που αρχίζει η ακτίνα.

Περιορισμοί της ανίχνευσης ακτίνας

Κατά την παρουσίαση του θεωρητικού μοντέλου τη ανίχνευση ακτίνα κάναμε πολλές παραδοχές για να βελτιώσουμε τις χρονικές επιδόσεις του αλγορίθμου μας. Η κυριότερη από αυτές ήταν ότι μπορούμε να λύσουμε το αρχικό μας πρόβλημα ενεργώντας αναδρομικά και χωρίς απώλεια της ακρίβειας. Θα δούμε τώρα πως καθεμιά από αυτές τις παραδοχές έβλαψε σε ελάχιστο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα καθώς και τις πιθανές μεθόδους αντιμετώπισης των προβλημάτων που προκύπτουν.

- Αναδίπλωση (aliasing)

Οι εικόνες που δημιουργούνται σε υπολογιστές απαρτίζονται από σειρές και στήλες εικονοστοιχείων και η τεχνική που είδαμε σχεδιάζει τέτοιες εικόνες ανιχνεύοντας μια ακτίνα παρατήρησης για κάθε εικονοστοιχείο, έτσι ώστε να καθορίσει το χρώμα του – αυτό όμως δημιουργεί ένα πρόβλημα γιατί δεν ανιχνεύεται κάθε ακτίνα, αλλά ουσιαστικά μόνο ένα δείγμα από αυτές. Αν χρησιμοποιήσουμε υψηλότερη ανάλυση (δηλαδή περισσότερες σειρές και στήλες εικονοστοιχείων για την ίδια επιφάνεια) στο προκαθορισμένο πλέγμα της οθόνης, θα έχουμε σωστότερο αποτέλεσμα αλλά και πάλι θα έχουμε χρησιμοποιήσει μόνο ένα δείγμα. Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, φαινόμενα όπως ο θόρυβος, τα σφάλματα και η παραμόρφωση οδηγούν σε φαινόμενα αναδίπλωσης, δηλαδή χρωματισμού του εικονοστοιχείου με άλλο χρώμα από το πραγματικό του και εισαγωγής στο χρωματικό φάσμα συνιστωσών που δε θα έπρεπε να υπάρχουν. Το πιο συνηθισμένο είδος αυτού του φαινομένου είναι η κλιμάκωση (staircase effect), κατά την οποία γραμμές που δεν είναι κάθετες ή οριζόντιες παρουσιάζονται με τη μορφή σκαλιών (jaggies), ενώ στην πραγματικότητα είναι ευθείες. Στις συνηθισμένες αναλύσεις εικόνας το φαινόμενο δεν είναι τραγικό, αλλά σίγουρα δημιουργεί κάποιες ατέλειες στο αποτέλεσμα. Μια αρκετά ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η υπερδειγματοληψία (supersampling). Εδώ υποδιαιρούμε τα εικονοστοιχεία σε μικρότερα μέρη, στέλνουμε ακτίνες σε καθένα από αυτά και υπολογίζουμε

το μέσο όρο από τις ακτίνες που συναντούν το αντικείμενο και από αυτές που αστοχούν. Συνήθως η υποδιαίρεση γίνεται σε ένα πλέγμα 3×3 μέσα σε κάθε εικονοστοιχείο, πράγμα που σημαίνει πως οι ακτίνες παρατήρησης αυξάνονται εννιά φορές και οι συνολικές ακτίνες μπορεί να αυξηθούν μέχρι και 90 φορές (θυμηθείτε το δένδρο ακτινών). Έτσι τελικά ο υπολογιστής χρειάζεται χρόνο 90 φορές μεγαλύτερο για τη σχεδίαση της εικόνας. Κάποια προγράμματα χρησιμοποιούν προσαρμοζόμενες (adaptive) τεχνικές στις οποίες η υπερδειγματοληψία γίνεται μόνο όταν τα εικονοστοιχεία έχουν διαφορά στο χρώμα που υπερβαίνει κάποια τιμή κατωφλίου. Ακόμα υπάρχει η δυνατότητα ελαφριάς μετακίνησης (jittering) τη ακτίνα για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της σταθερής θέσης του πλέγματος.

- **Αστοχία για μικρά αντικείμενα**

Σε περιπτώσεις ανίχνευσης ακτίνας σε μικρές αναλύσεις, οι ακτίνες παρατήρησης μπορεί να μη διασταυρωθούν καθόλου με μικρά σε όγκο αντικείμενα, όπως οι σταγόνες της βροχής ή αντικείμενα μικρού πάχους, όπως σύρματα ή κλωστές. Αυτό θα συμβεί αν ολόκληρο το αντικείμενο βρίσκεται ανάμεσα σε διαδοχικά εικονοστοιχεία και καμιά από τις ακτίνες παρατήρησης των δύο εικονοστοιχείων δε διασταυρωθεί με αυτό. Οι προσαρμοζόμενες τεχνικές δε βοηθούν εδώ γιατί δεν ενεργοποιούνται μέχρι η πρώτη ακτίνα παρατήρησης να διασταυρωθεί με το αντικείμενο και να διαπιστωθεί διαφορά στο χρώμα των εικονοστοιχείων. Η μόνη λύση είναι η χρήση υψηλότερη ανάλυση, αλλά και πάλι η πιθανότητα αστοχία είναι υπαρκτή.

Τα δύο αυτά προβλήματα οφείλονται στη δομή εικονοστοιχείων που έχουν οι εικόνες που δημιουργούνται σε υπολογιστές. Υπάρχουν όμως και πρόσθετα προβλήματα που είναι αποτέλεσμα του μοντέλου φωτισμού που χρησιμοποιούμε και αντιστοιχούν σε καθεμιά από τις απλοποιήσεις που δεχτήκαμε πάνω στην πραγματική συμπεριφορά της φωτεινής ακτινοβολίας.

- **Μονοχρωματική φωτεινή ακτινοβολία**

Οι ανιχνευτές ακτίνας προσομοιώνουν φαινόμενα όπως η διάθλαση και η διάχυση με δεδομένο ότι το φως αποτελείται από ομοιόχρωμα φωτόνια, ενώ στην πραγματικότητα αυτό αποτελείται από κύματα φωτονίων με διαφορετικό χρώμα. Έτσι στο περιβάλλον η φωτεινή ακτινοβολία δε συμπεριφέρεται ολόκληρη με τον ίδιο τρόπο, αλλά τα φωτόνια διαφορετικού χρώματος

διαθλώνται σε διαφορετικό βαθμό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όταν το λευκό φως - που είναι μείγμα φωτονίων όλων των χρωμάτων - περνά μέσα από πρισματικά αντικείμενα να διασπάται σε μια δέσμη ακτινών με διαφορετικά χρώματα. Ακόμα όταν το φως συναντά επιφάνειες με πολύ μικρές πτυχές, όπως έναν οπτικό δίσκος, διασπάται πάλι σε μια πολύχρωμη δέσμη ακτινών. Αυτό συμβαίνει γιατί ακτίνες με διαφορετικό μήκος κύματος αλληλοαναιρούνται ή προτίθενται μεταξύ τους. Μια λύση είναι να αποδώσουμε τη σκηνή μας με φωτεινές πηγές διαφορετικού χρώματος κάθε φορά και με ελαφρά διαφορετικό δείκτη διάθλασης στα αντικείμενα και να συνδυάσουμε τα διαδοχικά αποτελέσματα με προγράμματα επεξεργασίας εικόνας. Γενικά όμως η ανίχνευση ακτίνας στηρίζεται στο μονοχρωματικό μοντέλο φωτός και αγνοεί την κυματική φύση της φωτεινής ακτινοβολία.

- Προβλήματα στη δημιουργία σκιών

Οι φωτεινές πηγές στο περιβάλλον δεν είναι ποτέ σημειακές, αλλά είναι τρισδιάστατα αντικείμενα με μέγεθος και μορφή που επηρεάζει σημαντικά τη σκιά που ρίχνουν στα αντικείμενα. Αυτό συμβαίνει γιατί οι φωτεινές ακτίνες από διαφορετικά σημεία της φωτεινής πηγής χτυπούν το αντικείμενο με διαφορετική γωνία και δημιουργούν ημισκιά (soft shadow) σε σημεία όπου μόνο ένα μέρος του φωτός δεν περνάει. Σε προγράμματα ανίχνευσης ακτίνας μπορούμε να μιμηθούμε αυτό το φαινόμενο δημιουργώντας πολλές φωτεινές πηγές τη μία κοντά στην άλλη, ώστε να δημιουργούν τη μορφή του φωτεινού αντικειμένου. Αυτό όμως σημαίνει πολύ περισσότερες ακτίνες σκιάς και άρα πολύ αυξημένο χρόνο υπολογισμού.

- Σημειακό και διάχυτο φως - Διάθλαση

Ας υποθέσουμε πως η σκηνή μας περιέχει ένα καθρέφτη. Αν χρησιμοποιούσαμε ευθεία ανίχνευση ακτίνας, ο υπολογισμός της διαδρομής για καθεμιά από τις ανακλώμενες ακτίνες θα ήταν εύκολος, αφού ξεκινώντας από την πηγή απλά θα υπολογίζαμε τις διαδοχικές γωνίες ανάκλασης. Στην αντεστραμμένη ανίχνευση ακτίνας όμως είναι δύσκολο και χρονοβόρο να υπολογίσουμε αναδρομικά αν υπάρχουν και ποια σημεία του καθρέφτη που να ανακλούν το φως. Τεχνικές που λύνουν αυτό το πρόβλημα υπάρχουν μόνο για επίπεδους καθρέφτες και δεν έχουν εφαρμογή σε επιφάνειες κάθε μορφής. Οι συνηθισμένοι ανιχνευτές ακτίνας κάνουν λοιπόν την εξής παραδοχή : τα φωτεινά αντικείμενα

μπορούν να φαίνονται στους καθρέφτες, αλλά το φως τους δεν ανακλάται από αυτούς.

Έστω τώρα ότι η σκηνή μας είναι ένα δωμάτιο με κόκκινους τοίχους, χαλιά και κουρτίνες και ένα άσπρο έπιπλο. Στην πραγματικότητα το έπιπλο θα φανεί να κοκκινίζει ακόμα και με τη χρήση μόνο λευκού φωτισμού. Αυτό συμβαίνει γιατί μια ποσότητα του φωτός που συναντά τα άλλα αντικείμενα ανακλάται με διάχυση και φωτίζει με κόκκινο φως το άσπρο έπιπλο. Το διάχυτο φως που χρησιμοποιούν οι ανιχνευτές ακτίνας δε μπορεί να αναπαράγει αυτό το φαινόμενο και να φωτίσει τα αντικείμενα, παρά μόνο να μαλακώσει (soften) τις σκιές έτσι ώστε αυτές να μην είναι εντελώς σκοτεινές, δίνοντας την ψευδαίσθηση ότι το φως ανακλάται με διάχυση. Τεχνικές όπως το radiosity, που υποδιαιρεί το αντικείμενο σε μικρά κομμάτια (patches) των οποίων υπολογίζει το χρώμα και ακολούθως μεταχειρίζεται σαν μικρές φωτεινές πηγές, βοηθούν στη λύση του προβλήματος και προσφέρουν ανεξαρτησία υπολογισμού του χρώματος από τη θέση παρατήρησης, αλλά ξεφεύγουν από την παραδοσιακή ανίχνευση ακτίνας και έχουν άλλα μειονεκτήματα (απουσία σημειακής ανάκλασης και υπερβολικά μεγάλος χρόνος υπολογισμού).

Είδαμε προηγουμένως έναν τρόπο προσομοίωσης της διάσπασης του φωτός στο φάσμα του μέσα από ένα πρισματικό αντικείμενο. Η αντίθετη διαδικασία της σύνθεσης φωτεινών ακτινών σε ένα σημείο περνώντας τες από έναν κυρτό φακό είναι αδύνατη με το υπάρχον μοντέλο. Υπάρχουν τεχνικές που μιμούνται αυτό το φαινόμενο φωτίζοντας ή σκουραίνοντας τις σκιές διαφανών αντικειμένων, αλλά τέτοιες μέθοδοι είναι απλά προσεγγιστικές και μάλλον όχι ακριβείς. Επίσης τυχόν φαινόμενα σημειακής φωτεινότητας δεν υπολογίζονται ακριβώς. Σε τέτοιες περιπτώσεις θα έπρεπε η φωτεινή πηγή να ανακλάται στο σημείο σημειακής φωτεινότητας όπως πάνω σε ένα καθρέφτη ' αυτό μπορεί να γίνει δεχόμενοι στοιχειώδεις επιφανειακές ατέλειες στο συγκεκριμένο σημείο και υπολογίζοντας τέλεια σημειακή ανάκλαση, τέτοιοι όμως υπολογισμοί δεν έχουν μεγάλη πρακτική σημασία. Στην πράξη, μοντέλα όπως του Phong δίνουν αξιόπιστες λύσεις για αυτό το φαινόμενο, χωρίς μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού φορτίου.

Άλλες επεκτάσεις

Η φιλοσοφία που παρουσιάσαμε εδώ δείχνει μόνο ένα μικρό κομμάτι του τι μπορούμε να επιτύχουμε με την ανίχνευση ακτίνας - αν κάποιος χρήστης ενδιαφέρεται για ρεαλιστικότερες εικόνες μπορεί να υλοποιήσει μια ή περισσότερες από τις παρακάτω προτεινόμενες επεκτάσεις :

- ο Υπερδειγματοληψία

Όπως είδαμε στο θεωρητικό μοντέλο, η ανίχνευση μιας μόνο ακτίνας για κάθε εικονοστοιχείο έχει σαν αποτέλεσμα το φαινόμενο της αναδίπλωσης. Μια προτεινόμενη στη βιβλιογραφία λύση είναι η ανίχνευση ακτίνων στα άκρα του εικονοστοιχείου και ο τελικός συνδυασμός τους.

- ο Τύποι αντικειμένων

Ο χρήστης μπορεί να προσθέσει κι άλλους τύπους αντικειμένων στους ήδη υπάρχοντες, όπως πρισματικές επιφάνειες, θραύσματα (fractals) και επιφάνειες μιας γενέτειρας (surfaces of revolution).

- ο Περιοριστικοί όγκοι (bounding volumes)

Ο έλεγχος κάθε ακτίνας για διασταυρώσεις μπορεί να είναι απαγορευτικός για πολύπλοκες σκηνές. Μια λύση είναι ο καθορισμός περιοριστικών όγκων γύρω από πολύπλοκα αντικείμενα – αν κάποια ακτίνα δε διασταυρωθεί με αυτόν τον όγκο, δε γίνεται έλεγχος και για το αντίστοιχο αντικείμενο.

- ο Οκταδικά δένδρα (octrees)

Ο παραπάνω αλγόριθμος οδήγησε στην εφαρμογή των οκταδικών δένδρων για την υποδιαίρεση σε τμήματα του τρισδιάστατου χώρου. Με αυτά, η πιθανή διασταύρωση μιας ακτίνας με ένα αντικείμενο ελέγχεται μόνο αν και τα δύο (το αντικείμενο και η ακτίνα) βρίσκονται στο ίδιο ογδοημόριο του χώρου.

- ο Απόδοση υψής

Η προσομοίωση υψής στα αντικείμενα της σκηνής κάνει σίγουρα πιο ρεαλιστική την απόδοσή της. Ο χρήστης μπορεί να ορίσει με συναρτησιακό τρόπο ξύλινη ή μαρμάρινη υφή, κύματα και σταγονίδια.

Ακτινοβολία (radiosity)¹

Μερικά λόγια για το φως

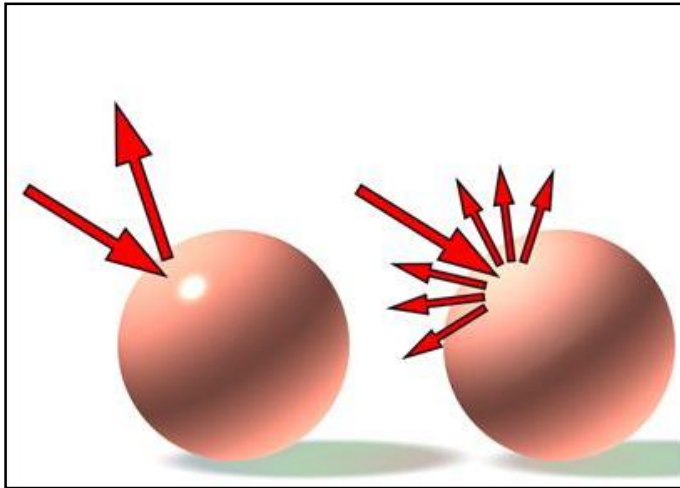
Η πιο συνηθισμένη αναπαράσταση της φωτεινής ακτινοβολίας σε μια συνθετική σκηνή περιορίζεται στη χρήση μιας φωτεινής πηγής με κατευθυνόμενη ή περιμετρική διάχυση του φωτός. Από την πηγή αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα τις σκιές που δημιουργούνται αν υπάρχουν αντικείμενα στην πορεία εκπομπής του φωτός. Στην πραγματικότητα ωστόσο, η συνεισφορά του φωτός δεν περιορίζεται στις συγκεκριμένες πηγές και σκιές: όλα τα αντικείμενα που συμμετέχουν σε μια σκηνή βοηθάνε στην δημιουργία του συνολικού φωτός που γίνεται τελικά ορατό. Εάν έχουμε ένα δωμάτιο και κάποιες πηγές φωτός (π.χ. ένα παράθυρο ή κάποια λάμπα), τότε συμμετέχουν στο φωτισμό του δωματίου και οι τοίχοι και τα αντικείμενα που υπάρχουν μέσω στο δωμάτιο, μέσω της αντανάκλασης που προκαλούν στο φως.

Από την αρχική περιγραφή του τρόπου αναπαράστασης του φωτός στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, παρατηρούμε ότι λείπει το στοιχείο της ανάκλασης, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο το φως μίας πηγή αλληλεπιδρά με τα υλικά αντικείμενα που συναντά. Το στοιχείο αυτό ίσως είναι και το σημαντικότερο αν θέλουμε να καταλάβουμε πως οι ίδιοι αντιλαμβάνομαστε το φως. Το φως μπορεί να προσεγγιστεί σαν ένα κύμα που ταξιδεύει στο χώρο με μία συγκεκριμένη συχνότητα. Η διαφοροποίηση στη συχνότητα και την πόλωση αυτού του κύματος, δημιουργεί τις διαφορές στο χρώμα που εμείς αντιλαμβάνομαστε και στο αν τελικά το αντιλαμβάνομαστε, δηλαδή αν το φως είναι ορατό ή όχι.

Καθώς το φως ταξιδεύει συναντά διάφορα εμπόδια, στην περίπτωση μας τα έπιπλα του δωματίου ή τους τοίχους και ανακλάται πλαστικά. Κάποιο μέρος της ενεργείας του απορροφάται από τα αντικείμενα, γι' αυτό βλέπουμε και τα χρώματά τους, ενώ το υπόλοιπο αντανάκλαται. Η αντανάκλαση αυτή συνεισφέρει εξίσου, όπως και η αρχική μας πηγή, στο φωτισμού του χώρου.

¹ Το δεύτερο τμήμα του κεφαλαίου στηρίχθηκε σε κείμενο του Αντώνη Μάνδηλα

Τα αντικείμενα που προκαλούν την ανάκλαση διαφέρουν κυρίως ως προς τον τύπο του υλικού με το οποίο καλύπτονται. Έτσι υπάρχουν αντικείμενα γυαλιστερά, ή το υλικό τους έχει τις ιδιότητες ενός καθρέπτη, τα οποία αντανακλούν κατευθυντικά το φως. Επίσης υπάρχουν και εκείνα που είναι καλυμμένα με τραχεία υλικά, τα οποία τείνουν να αντανακλούν το φως προς όλες τις κατευθύνσεις.



Εικόνα 6: Δύο περιπτώσεις ανάκλασης πάνω σε μια γυαλιστερή (αριστερά) και μια θαμπή επιφάνεια

Αλγόριθμοι περιγραφής ακτινοβολίας

Υπάρχουν δύο οικογένειες αλγόριθμων υπολογισμού του φωτισμού μιας σκηνής και της αλληλεπίδρασης με τα διάφορα αντικείμενα (illumination algorithms). Στον τοπικό (local) τρόπο υπολογισμού του φωτισμού λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τον υπολογισμό ατομικά τα διάφορα αντικείμενα. Με τους γενικούς τύπους υπολογίζεται το φως που αντανακλάται και απορροφάται από αυτά. Στη συνέχεια βρίσκεται η πηγή του φωτός που δημιουργεί τη σκηνή μας. Για τον υπολογισμό της φωτεινότητας χρησιμοποιούμε μόνο τις πηγές που δείχνουν κατεύθυνση πάνω στο υπολογιζόμενο υλικό. Ωστόσο γίνεται αντιληπτό, ότι για την αναπαράσταση λεπτομερών σκηνών χρειαζόμαστε ένα τρόπο να υπολογίζουμε και τις αλληλεπιδράσεις.

Στους καθολικούς (global) τρόπους υπολογισμού, όπως είναι η ανάκλαση ακτίνας και η ακτινοβολία, λαμβάνεται υπ' όψιν πέρα από τις πηγές του φωτός και ο τρόπος αλληλεπίδρασης με τα διάφορα αντικείμενα.

Ο αλγόριθμος ακτινοβολίας προτάθηκε πρώτη φορά από το πανεπιστήμιο του Cornell το 1984, σε μία εργασία με τίτλο “Modeling the Interaction of Light between Diffuse Surfaces”, από

τους Goral, Torrance και Greenberg. Η ιδέα της εργασίας ήταν να προσομοιωθεί ο τρόπος με τον οποίο η ενέργεια μεταβιβάζεται από επιφάνεια σε επιφάνεια. Το αποτέλεσμα που απέδιδε ο αλγόριθμος ήταν ανεξάρτητο της γωνία θέασης της σκηνής. Αυτό ήταν πολύ σημαντικό αφού υπήρχε η δυνατότητα υπολογισμού του φωτισμού στην αρχή, μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία, και στη συνέχεια να μπορεί κάποιος να πάρει όψεις της σκηνής από πολλές διαφορετικές γωνίες. Αυτό μεταφράζεται στο τι γίνεται σε πολλά παιχνίδια πρώτου προσώπου σήμερα.

Τρόπος υπολογισμού

Στον αλγόριθμο αυτό ως πηγές φωτισμού δεν χρησιμοποιούνται σημειακές ή κατευθυντικές πηγές, αλλά επιφάνειες που αντανακλούν το φως. Στην πραγματική ζωή αυτό μεταφράζεται σε ένα σκοτεινό δωμάτιο και ένα μία επιφάνεια ημιδιαφανή που πίσω της υπάρχει ένα σύνολο από μικρά φώτα, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι μία πηγή φωτός με πεπερασμένη κι όχι σημειακή επιφάνεια.

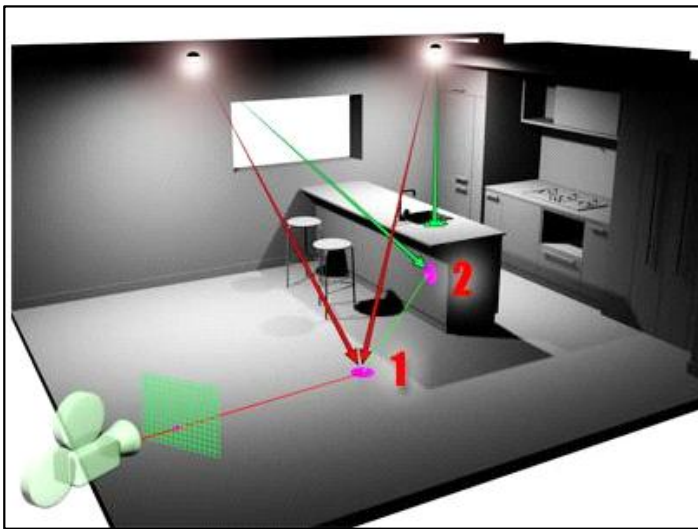
Κάθε επιφάνεια για την επίλυση του αλγόριθμου έχει δύο συσχετιζόμενες τιμές: πόσο έντονα μπορεί να εκπέμπει φως και πόση ενέργεια δέχεται από τις επιφάνειες που περιβάλλεται. Θέλοντας να υπολογίσουμε την αλληλεπίδραση μεταξύ οποιασδήποτε επιφάνειας προς όλες τις υπόλοιπες έχουμε ένα πρόβλημα τάξης n^2 . Μπορούμε να υπολογίσουμε την αλληλεπίδραση βάση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των επιφανειών (απόσταση, μορφή κτλ.). Το αποτέλεσμα θα είναι μία τιμή για κάθε επιφάνεια που ονομάζεται “form factor” ή μπορούμε να το μεταφράσουμε ως «συνεισφορά της επιφάνειας».

Υπολογίζουμε την ζητούμενη τιμή για κάθε μία επιφάνεια που εμπλέκεται στη σκηνή μας και τις αποθηκεύουμε σε ένα πίνακα που ονομάζουμε «πίνακα radiosity». Αυτός είναι ένας διδιάστατος πίνακας μεγέθους $n \times n$, όπου n ο αριθμός των αντικειμένων που συνεισφέρουν. Σε κάθε θέση του πίνακα έχουμε την τιμή της αλληλεπίδρασης του στοιχείου της γραμμής με αυτό της στήλης.

Για την επίλυση του παραπάνω πίνακα κάνουμε κυκλικά τον παρακάτω υπολογισμό. Επισκεπτόμαστε κάθε στοιχείο του πίνακα και μεταφέρουμε ορισμένη από την αποθηκευμένη ενέργεια στο δέκτη, ως ένταση ακτινοβολίας, ωστόσο η επιφάνειες αντανακλούν κάποια ποσότητα ενέργεια, οπότε στην τιμή που αφαιρέσαμε προσθέτουμε την τιμή της έντασης που αντανακλάται από

την επιφάνεια – δέκτη. Αυτές οι ποσότητες είναι ανάλογες του πόσου ποσοστού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μία επιφάνεια την αντανακλά ή την απορροφά.

Εάν η επιφάνεια – δέκτης είναι μία πλήρως ανακλαστική επιφάνεια, τότε η ενέργεια δε θα αποθηκευτεί ως ενέργεια φωτισμού, αλλά ως εκπεμπόμενη ακτινοβολία, ενώ αν είναι αντίθετης μορφής, π.χ. μία μαύρη επιφάνεια, κανένα ποσό από την προσπίπτουσα ακτινοβολία δε θα επανέλθει στη σκηνή ενώ ένα ποσοστό της θα προστεθεί ως ενέργεια φωτισμού της επιφάνειας. Τα βήματα αυτά επαναλαμβάνονται μέχρι για κάθε μία επιφάνεια η τιμή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας να είναι πολύ μικρή.

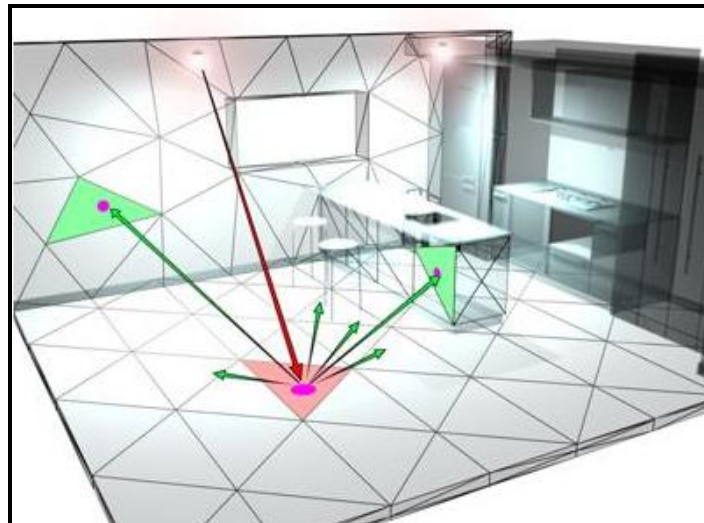


Εικόνα 7: Υπολογισμός με τη μέθοδο ανίχνευσης ακτίνας

Με τους παραπάνω υπολογισμούς καταλήγουμε σε μια τιμή για την ένταση με την οποία εκπέμπει φως μία επιφάνεια, π.χ. ο τοίχος ενός σπιτιού. Για να προσεγγίσουμε καλύτερα αυτήν την επιφάνεια, τη διαιρούμε σε άλλες μικρότερες, που τις ονομάζουμε «κύτταρα» (patches). Αυτά τα κύτταρα έχουν τις δικές τους τιμές για το ποσοστό της ακτινοβολίας που εκπέμπουν και απορροφούν. Έτσι μπορούμε να τα χειριστούμε ως κανονικές επιφάνειες. Τελικά ο πίνακας που θα πρέπει να υπολογίσουμε θα είναι ίσο με τον αριθμό των κυττάρων στο τετράγωνο.

Μια σχετικά απλή σκηνή με 10^3 επιφάνειες θα έχει έναν πίνακα υπολογισμού της τάξης του 10^6 στοιχείων. Εάν κάθε επιφάνεια τη χωρίσουμε σε ένα πλέγμα 8×8 τότε φτάνουμε στον εξωπραγματικό αριθμό των $4.096 \cdot 10^6$ στοιχείων για τον πίνακα μας. Ένα από τα προβλήματα που δημιουργούνται από έναν τόσο μεγάλο πίνακα είναι ο μεγάλος χρόνος υπολογισμού. Θα θέλαμε αν ήταν δυνατόν να ξέρουμε αν έχει γίνει ένα λάθος στη σκηνή προτού χρειαστεί να επιλύσουμε ολόκληρο τον πίνακα.

Εικόνα 8: Υπολογισμός με τη μέθοδο ακτινοβολίας



Προοδευτικός (progressive) υπολογισμός

Το 1988 οι Cohen, Chen, Wallace & Greenberg σε μία εργασία με τίτλο “A progressive Refinement Approach to Fast Radiosity Image Generation”, περιέγραψαν έναν νέο τρόπο υπολογισμού που χρειαζόταν πολύ λιγότερο χρόνο, σε αυτό βοήθησε το γεγονός ότι άλλαξαν τη σειρά με την οποία γίνονταν οι διάφοροι υπολογισμοί.

Πρώτη και σημαντικότερη αλλαγή είναι ότι στον τρόπο υπολογισμού με πίνακα που αναφέραμε προηγούμενα κάθε στοιχείο «μάζευε» ένταση φωτοβολίας από κάθε γειτονικό του που εξέπεμπε ακτινοβολία, εδώ αντίθετα χρησιμοποιείται η ένταση που εκπέμπεται.

Η βασική ιδέα πίσω από αυτό τον τρόπο υπολογισμού είναι η εύρεση εκείνης της επιφάνεια που μπορεί να προσφέρει την περισσότερη ενέργεια στη σκηνή. Αφού βρεθεί αυτή η επιφάνεια υπολογίζεται η αλληλεπίδρασή της με τις υπόλοιπες επιφάνειες της σκηνής. Η σκηνή τώρα μπορεί να αποδοθεί έτσι ώστε να γίνει ορατή στο χρήστη. Σε κάθε επανάληψη βρίσκεται η πιο έντονη, ενεργειακά, επιφάνεια και υπολογίζεται όλη η σκηνή. Στη διάρκεια αυτών των επαναλήψεων εάν ο χρήστης παρατηρήσει ότι κάτι είναι λάθος, ή δεν αποδίδεται όπως αυτός επιθυμεί, τότε μπορεί να διακόψει την όλη διαδικασία.

Ο χρήστης στη διάρκεια των υπολογισμών θα δει μία πλήρως μαύρη σκηνή να μεταμορφώνεται προοδευτικά σε μία πλήρως φωτισμένη. Για την αποφυγή αυτής της μεγάλης διαφοράς στο οπτικό αποτέλεσμα προστίθεται στους υπολογισμούς μία σταθερή ένταση διάχυτου (ambient) φωτισμού – στον πραγματικό

κόσμο δεν υπάρχει τέτοιος όρος, αφού το φως αντανακλάται πάντα από επιφάνειες και δεν «υπάρχει» απλά στο χώρο. Ο όρος που προσθέτουμε στους υπολογισμούς είναι η μέση εκπεμπόμενη ακτινοβολία όλης της σκηνής, καθώς όμως γίνονται οι υπολογισμοί αυτός ο όρος τείνει να μηδενιστεί, αφού σε κάθε βήμα η κάθε επιφάνεια μειώνει την προσφερόμενη ενέργειά της στη σκηνή. Τελικά αυτός ο όρος τείνει να μηδενιστεί, έτσι έχουμε το φωτορεαλιστικό αποτέλεσμα.

Μειώνοντας το μέγεθος του πίνακα υπολογισμού

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε ότι για τη βελτιστοποίηση της υπολογιζόμενης φωτεινότητας διαιρούμε την κάθε επιφάνεια σε μικρότερα τμήματα – αυτό μάς δημιουργεί το πρόβλημα ότι ο πίνακας υπολογισμού γίνεται πολύ μεγάλος.

Υπάρχουν δύο τρόποι διαίρεσης μία επιφάνεια σε μικρότερες, ένας «τυφλός» και ένας έξυπνος. Με τον πρώτο τρόπο απλά διαιρείται μία επιφάνεια σε ένα προκαθορισμένο αριθμό μικρότερων, στο παράδειγμά μας ποιο πριν είπαμε ότι διαιρείται σε μικρότερες 8x8. Αυτός δεν είναι αποδοτικός τρόπος, αφού διαιρούνται όλες οι επιφάνειες ενώ μπορεί να μη χρειάζεται.

Ένας πιο έξυπνος τρόπος να κάνουμε την ίδια δουλειά είναι να γίνει μία αρχική, περιορισμένου μεγέθους, διαίρεση των επιφανειών και σε κάθε βήμα του αλγορίθμου να βρίσκουμε αν δύο γειτονικές επιφάνειες έχουν μεγάλες διαφορές στην υπολογιζόμενη ένταση και να τις διαιρούμε σε μικρότερες εκ νέου. Αυτή η διαδικασία σταματάει σε κάποιο όριο διαφοράς των εντάσεων που θέτει ο χρήστης. Αυτός ο τρόπος έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται αρκετά ο πίνακας υπολογισμού, ενώ παράλληλα τα επίπεδα αληθοφάνειας κρατούνται σε υψηλά επίπεδα, αφού στα σημεία έντονης αλλαγής της ακτινοβολίας υπάρχει μεγάλη λεπτομέρεια (π.χ. στα όρια μίας σκιάς σε έναν τοίχο).

Τελικά κάθε μία από τις διαιρεμένες επιφάνειες διαιρείται εκ νέου σε σταθερού μεγέθους, αυτή τη φορά, μικρότερες επιφάνειες, που ονομάζονται στοιχεία (elements). Το γεγονός ότι η σκηνή διαιρείται σε επιφάνειες ίσου μεγέθους, επιταχύνει σημαντικά τους υπολογισμούς. Μπορούμε να φανταστούμε τα στοιχεία ως αναπαράσταση, σε μεγαλύτερη ανάλυση, των προγόνων τους που ήταν τύπου patch. Μια σημαντική διαφορά είναι ότι, ενώ για να δημιουργήσουμε τα αρχικά κύτταρα αλλάζουμε το αρχικό σχήμα μας, για να δημιουργήσουμε τα τελικά στοιχεία δεν αλλά-

ζουμε τη μορφή των επιφανειών. Επίσης μπορούμε να φαντα-
στούμε ότι χρησιμοποιούμε τα κύτταρα για να εκπέμπουν ακτι-
νοβολία, ενώ τα στοιχεία για να το απορροφούν.