

Γραφική με Υπολογιστές

3^η Εργασία Μαθήματος 2022 - 2023

Αλεξόπουλος Δημήτριος AEM 10091

aadimitri@ece.auth.gr

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή: Θέαση	4
2	Υλοποίηση	5
2.1	Φωτισμός και Υλικό Επιφάνειας	5
2.1.1	Υλικό Επιφάνειας	5
2.1.2	Σημειακή Πηγή Φωτός	5
2.1.3	Φωτισμός	5
2.2	Shading	6
2.2.1	Υπολογισμός Κανονικών Διανυσμάτων Επιφάνειας	7
2.2.2	Συνάρτηση Φωτογράφισης	7
2.2.3	Gouraud Shading	8
2.2.4	Phong Shading	9
3	Αποτελέσματα - Σχολιασμοί	10
	Βιβλιογραφία	12

Κατάλογος Σχημάτων

3.1	Gouraud - Ambient light	10
3.2	Gouraud - Diffusion light	10
3.3	Gouraud - Specular light	10
3.4	Gouraud - Full light	10
3.5	Phong - Ambient light	11
3.6	Phong - Diffusion light	11
3.7	Phong - Specular light	11
3.8	Phong - Full light	11

1 Εισαγωγή: Θέαση

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η προσαρμογή κι αξιοποίηση των αλγορίθμων σκίασης που κατασκευάστηκαν στις προηγούμενες δύο εργασίες, ώστε να δημιουργηθεί ένα πλήρες πλαίσιο φωτογραφίας μίας εικονικής σκηνής.

Κατά την φωτογράφιση ενός αντικειμένου θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο φωτισμός του χώρου, καθώς και το υλικό της επιφάνειας του αντικειμένου. Διαφορετικά υλικά αντανακλούν και διαχέουν διαφορετικά τις ακτίνες του φωτός στο χώρο.

Θα επιχειρήσουμε, λοιπόν, να αποτυπώσουμε μια εικονική σκηνή ενός αντικειμένου για διάφορα είδη φωτισμού (**ambient, diffusion, specular**) και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα για δυο αλγορίθμους σκίασης (**gouraud, phong**).

2 Υλοποίηση

Στόχος μας είναι να κατασκευάσουμε τις συναρτήσεις που θα μας επιτρέψουν τόσο την περιγραφή του φωτισμού και του υλικού της επιφάνειας του αντικειμένου, όσο και την αξιοποίηση αυτών για την πλήρη σκίαση του αντικειμένου. Προς διευκόλυνσή μας, πέρα από τις βασικές συναρτήσεις θα κατασκευάσουμε και κάποιες βοηθητικές συναρτήσεις και κλάσεις.

2.1 Φωτισμός και Υλικό Επιφάνειας

Ξεκινάμε με την κατασκευή κλάσεων και συναρτήσεων που θα μας επιτρέψουν την προσο-
μείωση του φωτισμού του αντικειμένου στον πραγματικό κόσμο.

2.1.1 Υλικό Επιφάνειας

Υλοποιούμε, αρχικά, την κλάση *PhongMaterial*, η οποία περιγράφει τις συνιστώσες ενός υλικού μιας 3Δ επιφάνειας που θα αποτυπωθεί μέσω του μοντέλου φωτισμού *Phong*. Η κλάση περιέχει τα εξής:

- *k_a*: συντελεστής διάχυτου φωτός από το περιβάλλον
- *k_d*: συντελεστής διάχυτης ανάκλασης
- *k_s*: συντελεστής κατοπτρικής ανάκλασης
- *n_{-phong}*: ακέραια σταθερά *Phong* που καθορίζει το βαθμό διασποράς των ανακλωμενων ακτίνων από την επιφάνεια

2.1.2 Σημειακή Πηγή Φωτός

Έπειτα, δημιουργούμε την κλάση *PointLight*, η οποία υλοποιεί μία σημειακή πηγή φωτός και περιέχει:

- *pos*: θέση του φωτός στον τρισδιάστατο χώρο (διάνυσμα 1×3)
- *intensity*: ένταση που ακτινοβολεί για κάθε χρωματική συνιστώσα (διάνυσμα 1×3, με κάθε συνιστώσα να ανήκει στο διάστημα [0, 1]).

2.1.3 Φωτισμός

Υλοποιούμε την κύρια συνάρτηση για τον φωτισμό $I = \text{light}(\text{point}, \text{normal}, \text{vcolor}, \text{cam_pos}, \text{mat}, \text{lights}, \text{lighting})$, η οποία υπολογίζει το φωτισμό ενός σημείου *point*, το οποίο ανήκει σε μία επιφάνεια με υλικό τύπου *Phong*, λόγω του διάχυτου φωτισμού από το περιβάλλον, της διάχυτης ανάκλασης και της κατοπτρικής ανάκλασης. Έχει τα εξής ορίσματα κι εξόδους:

- *point*: διάνυσμα-στήλη 3×1 με τις συντεταγμένες του σημείου της επιφάνειας

- *normal*: διάνυσμα-στήλη 3×1 με τις συντεταγμένες του κανονικού διανύσματος της επιφανείας στο σημείο *point* (δηλαδή του κάθετου διανύσματος προς την επιφάνεια)
- *vcolor*: 3×1 διάνυσμα με τις συνιστώσες του χρώματος του σημείου *P*. κάθε συνιστώσα ανήκει στο διάστημα $[0, 1]$
- *cam_pos*: διάνυσμα-στήλη 3×1 με τις συντεταγμένες του παρατηρητή (δηλαδή της κάμερας)
- *mat*: αντικείμενο τύπου *PhongMaterial*
- *lights*: λίστα από αντικείμενα τύπου *PointLight*
- *lighting*: είδος του φωτισμού {"ambient", "diffusion", "specular", "full"}
- *I*: ένταση της τριχρωματικής ακτινοβολίας, που ανακλάται από το σημείο *P*

Προκειμένου να υπολογίσουμε την ένταση της τριχρωματικής ακτινοβολίας για κάθε μία από τις περιπτώσεις φωτισμού κατασκευάζουμε τρεις βοηθητικές συναρτήσεις:

1. *I* = ambient(mat, light_amb): υπολογίζει την συνιστώσα της έντασης που οφείλεται στο διάχυτο φως από το περιβάλλον με βάση τον τύπο

$$I_\lambda = I_\alpha k_{\alpha\lambda} \quad (2.1)$$

2. *I* = diffusion(point, normal, vcolor, mat, lights): υπολογίζει την συνιστώσα της έντασης που οφείλεται στην διάχυτη ανάκλαση στην επιφάνεια του αντικειμένου με βάση τον τύπο

$$I_\lambda = I_{p\lambda} k_{d\lambda} (\hat{N} \hat{L}) \quad (2.2)$$

3. *I* = specular(point, normal, vcolor, cam_pos, mat, lights): υπολογίζει την συνιστώσα της έντασης που οφείλεται στην κατοπτρική ανάκλαση στην επιφάνεια του αντικειμένου με βάση τον τύπο

$$I_\lambda = I_{p\lambda} k_{s\lambda} [2(\hat{N}(\hat{N} \hat{L}) - \hat{L}) \hat{V}]^n \quad (2.3)$$

όπου I_α είναι η ένταση του διάχυτου φωτός, $I_{p\lambda}$ η ένταση της πηγής, $k_{\alpha\lambda}, k_{d\lambda}, k_{s\lambda}$ οι συντελεστές αντίστοιχα για κάθε είδος φωτισμού, \hat{N} το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια, \hat{L} το μοναδιαίο διάνυσμα με κατεύθυνση παράλληλη προς την προσπίπτουσα ακτίνα και \hat{V} το μοναδιαίο διάνυσμα που δείχνει προς τον παρατηρητή. Η κάθε επιμέρους ένταση που υπολογίζεται συνεισφέρει αθροιστικά στο χρώμα του εικονοστοιχείου.

2.2 Shading

Στη συνέχεια θα κατασκευάσουμε τις συναρτήσεις που θα αξιοποιήσουν το μοντέλο φωτισμού που περιγράψαμε παραπάνω για την σωστή σκίαση του αντικειμένου με βάση το κάθε είδος φωτισμού.

2.2.1 Υπολογισμός Κανονικών Διανυσμάτων Επιφάνειας

Υλοποιούμε την συνάρτηση `normals = calculate_normals(verts, faces)` με τα εξής ορίσματα κι εξόδους:

- *verts*: $3 \times N_v$ πίνακας με τις συντεταγμένες των κορυφών του αντικειμένου
- *faces*: $3 \times N_T$ πίνακας που περιγράφει τα τρίγωνα· η k -οστή στήλη του *faces* περιέχει τους αύξοντες αριθμούς των κορυφών του k -οστού τριγώνου του αντικειμένου, $1 \leq k \leq N_T$. Η σειρά παράθεσης των κορυφών σηματοδοτεί με τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία την κατεύθυνση του κανονικού διανύσματος και άρα και προς τα που είναι η εξωτερική πλευρά του αντικειμένου
- *normals*: $3 \times N_v$ πίνακας με τις συντεταγμένες των κάθετων διανυσμάτων σε κάθε σημείο (κορυφή) της επιφάνειας που ορίζει το αντικείμενο

2.2.2 Συνάρτηση Φωτογράφισης

Υλοποιούμε, έπειτα, την συνάρτηση `img = render_object(shader, focal, eye, lookat, up, bg_color, M, N, H, W, verts, vert_colors, faces, mat, lights, light_amb, lighting)` που περιέχει τα εξής:

- *shader*: δυαδική μεταβλητή ελέγχου που χρησιμοποιείται για να επιλέξει τη συνάρτηση που θα χρησιμοποιηθεί για την πλήρωση των τριγώνων (*gouraud*, *phong*)
- *focal*: η απόσταση του πετάσματος από το κέντρο της κάμερας (στις μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιεί το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας)
- *eye*: 3×1 διάνυσμα με τις συντεταγμένες του κέντρου της κάμερας
- *lookat*: 3×1 διάνυσμα με τις συντεταγμένες του σημείου στόχου της κάμερας
- *up*: 3×1 μοναδιαίο *up* διάνυσμα της κάμερας
- *bg_color*: 3×1 διάνυσμα με τις χρωματικές συνιστώσες του φόντου
- *M, N*: οι διαστάσεις της παραγόμενης εικόνας σε *pixel*
- *H, W*: οι φυσικές διαστάσεις του πετάσματος της κάμερας σε μονάδες μήκους ταυτόσημες με αυτές που χρησιμοποιούνται στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας
- *verts*: πίνακας $3 \times N_v$ με τις συντεταγμένες των κορυφών του αντικειμένου
- *vert_colors*: πίνακας $3 \times N_v$ με τις συνιστώσες του χρώματος κάθε κορυφής του αντικειμένου
- *faces*: περιέχει τους αύξοντες αριθμούς των κορυφών του k -οστού τριγώνου του αντικειμένου, $1 \leq k \leq N_T$. Η σειρά παράθεσης των κορυφών σηματοδοτεί με τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία την κατεύθυνση του κανονικού διανύσματος και άρα και προς τα που είναι η εξωτερική πλευρά του αντικειμένου
- *mat*: αντικείμενο τύπου *PhongMaterial*

- *lights*: λίστα από αντικείμενα τύπου *PointLight*
- *light_amb*: 3×1 διάνυσμα με τις συνιστώσες της έντασης της διάχυτης ακτινοβολίας του περιβάλλοντος. Κάθε συνιστώσα ανήκει στο διάστημα $[0, 1]$
- *lighting*: είδος του φωτισμού {"ambient", "diffusion", "specular", "full"}
- *img*: η παραγόμενη εικόνα

Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει, αρχικά, τα κανονικά διανύσματα των κορυφών του αντικειμένου μέσω της συνάρτησης *calculate_normals*. Προβάλλει τις κορυφές των τριγώνων σε ορθογώνιο πέτασμα κάμερας με χρήση της συνάρτησης *PinHole* της προηγούμενης εργασίας. Τα τρίγωνα με κορυφή εκτός του πετάσματος δεν χρωματίζονται.

Τέλος, καλεί επανειλημμένα την αντίστοιχη συνάρτηση πλήρωσης που έχει επιλεγεί βάσει της τιμής της μεταβλητής *shader* για να χρωματίσει κάθε τρίγωνο του αντικειμένου, ξεκινώντας από εκείνα με το μεγαλύτερο βάθος.

Για δεδομένο τρίγωνο, υπολογίζουμε τα διανύσματα *V* και *L* των μοντέλων φωτισμού μία φορά χρησιμοποιώντας ως σημείο *P* το βαρύκεντρο του τριγώνου (πριν την προβολή του) και τα θεωρούμε σταθερά για όλα τα σημεία του τριγώνου.

2.2.3 Gouraud Shading

Τροποποιούμε κατάλληλα την συνάρτηση *Gouraud Shading* που έχει υλοποιηθεί σε προηγούμενη εργασία, ώστε να λαμβάνει υπόψη τον φωτισμό του αντικειμένου κατά την σκίασή του. Η τροποποιημένη συνάρτηση, λοιπόν, *shade_gouraud(verts_p, verts_n, verts_c, bcoords, cam_pos, mat, lights, light_amb, X, lighting)* έχει τα εξής ορίσματα κι εξόδους:

- *verts_p*: 2×3 πίνακας που περιέχει τις συντεταγμένες των κορυφών του τριγώνου μετά την προβολή τους στο πέτασμα της κάμερας
- *verts_n*: 3×3 πίνακας που περιέχει στις στήλες του τα κανονικά διανύσματα των κορυφών του τριγώνου
- *verts_c*: 3×3 πίνακας που περιέχει τις συνιστώσες χρώματος για κάθε σημείο του τριγώνου
- *bcoords*: 3×1 διάνυσμα που περιέχει το κέντρο βάρους του τριγώνου πριν την προβολή του
- *cam_pos*: διάνυσμα-στήλη 3×1 με τις συντεταγμένες του παρατηρητή (δηλαδή της κάμερας)
- *mat*: αντικείμενο τύπου *PhongMaterial*
- *lights*: λίστα από αντικείμενα τύπου *PointLight*
- *light_amb*: 3×1 διάνυσμα με τις συνιστώσες της έντασης της διάχυτης ακτινοβολίας του περιβάλλοντος. Κάθε συνιστώσα ανήκει στο διάστημα $[0, 1]$
- *X*: εικόνα (πίνακας διάστασης $M \times N \times 3$) με τυχόν προϋπάρχοντα τρίγωνα

- *lighting*: είδος του φωτισμού {"ambient", "diffusion", "specular", "full"}
- *updatedcanvas*: πίνακας διάστασης $M \times N \times 3$ που για τα σημεία του τριγώνου θα περιέχει τις αντίστοιχες χρωματικές συνιστώσες, καθώς και τα προϋπάρχοντα τρίγωνα της εισόδου X (επικαλύπτοντας τυχόν κοινά χρωματισμένα σημεία που προϋπήρχαν από άλλα τρίγωνα)

Η συνάρτηση αυτή υπολογίζει το χρώμα στις κορυφές του δοθέντος τριγώνου με βάση το πλήρες μοντέλο φωτισμού που περιγράφηκε παραπάνω και στη συνέχεια χρησιμοποιεί γραμμική παρεμβολή χρώματος για την εύρεση του χρώματος στα εσωτερικά σημεία του τριγώνου. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιεί τη συνάρτηση *interpolate_vectors* της προηγούμενης εργασίας.

2.2.4 Phong Shading

Τέλος, με παρόμοιο τρόπο κατασκευάζουμε την συνάρτηση *shade_phong*(verts_p, verts_n, verts_c, bcoords, cam_pos, mat, lights, light_amb, X, lighting), η οποία έχει ακριβώς τα ίδια ορίσματα κι εξόδους με την συνάρτηση *shade_gouraud*().

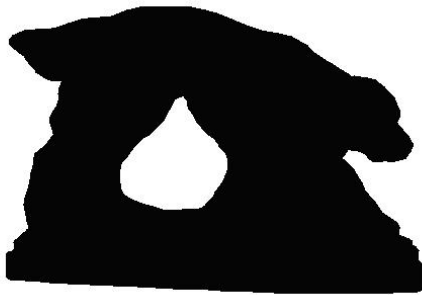
Υπολογίζει το χρώμα των σημείων του τριγώνου πραγματοποιώντας παρεμβολή, τόσο στα κανονικά διανύσματα, όσο και στα χρώματα των κορυφών. Συγκεκριμένα, για το δοθέν τρίγωνο, υπολογίζει τα κανονικά διανύσματα των αρχικών σημείων (πριν την προβολή) κατά μήκος των ενεργών πλευρών, εκτελώντας γραμμική παρεμβολή στα κανονικά διανύσματα των κορυφών της πλευράς.

Για κάθε εσωτερικό σημείο, υπολογίζει το κανονικό διάνυσμα κατά μήκος του *scan line* εκτελώντας γραμμική παρεμβολή στα κανονικά διανύσματα που αντιστοιχούν στα ενεργά σημεία της πλευράς. Παρόμοια διαδικασία πραγματοποιείται και για τα χρώματα των σημείων. Έχοντας υπολογίσει, ακόμη, το κανονικό διάνυσμα και το χρώμα για ένα σημείο, το χρώμα του θα προκύπτει χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση *light*() που υλοποιήθηκε παραπάνω.

3 Αποτελέσματα - Σχολιασμοί

Θα δούμε, τώρα, τα αποτελέσματα της παραπάνω υλοποίησης. Για κάθε επιλογή *shader* (*Gouraud* ή *Phong*) θα παράγουμε 4 φωτογραφίες: 3 με χρήση μόνο ενός είδους φωτισμού (*ambient*, *diffusion*, *specular*) και μία τέταρτη με συνδυασμό όλων των προηγούμενων.

Παρακάτω βλέπουμε τις φωτογραφίες που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τον *gouraud shader*:



Σχήμα 3.1: *Gouraud - Ambient light*



Σχήμα 3.2: *Gouraud - Diffusion light*

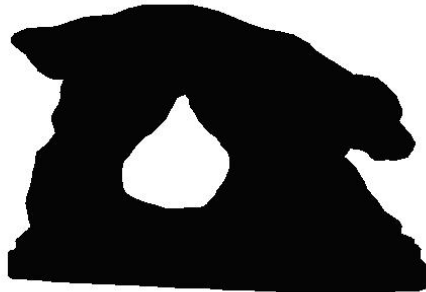


Σχήμα 3.3: *Gouraud - Specular light*



Σχήμα 3.4: *Gouraud - Full light*

Βλέπουμε, τέλος, και τις φωτογραφίες που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τον *phong shader*:



Σχήμα 3.5: *Phong - Ambient light*



Σχήμα 3.6: *Phong - Diffusion light*



Σχήμα 3.7: *Phong - Specular light*



Σχήμα 3.8: *Phong - Full light*

Σχόλια:

- Δεν παρατηρούμε κάποια εμφανή διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων σκίασης, ωστόσο η μέθοδος *Phong* είναι αρκετά πιο χρονοβόρα στην εκτέλεση, καθώς υπολογίζει την γραμμική παρεμβολή τόσο των χρωμάτων, όσο και των κανονικών διανυσμάτων σε κάθε επανάληψη.
- Οι σκιές φαίνονται ρεαλιστικές εάν αντιληφθούμε το αντικείμενο και τον φωτισμό στον πραγματικό κόσμο.

Βιβλιογραφία

[1] Σημειώσεις του μαθήματος