

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

2

Ροή Εργασιών Γραφικών

Στόχος των Γραφικών είναι η σύνθεση και αναπαράσταση στην οθόνη ή σε άλλο μέσο απεικόνισης σκηνών δύο ή τριών διαστάσεων. Με το γενικό όρο *σκηνή* αναφερόμαστε σε ένα μεμονωμένο αντικείμενο ή μία συλλογή αντικειμένων με συγκεκριμένους συσχετισμούς μεταξύ τους. Η προβολή της σκηνής υπονοεί την παρουσία μίας ή περισσότερων απόψεών της. Η γενική αυτή περιγραφή μπορεί να εξειδικεύεται και να αφορά ένα ευρύ φάσμα απεικονίσεων από τη σύνθεση αφηρημένων καλλιτεχνικών εικόνων ως την κατασκευή ρεαλιστικών τεχνικών αναπαραστάσεων. Ωστόσο, η διαδικασία που ξεκινά με την μοντελοποίηση των μεμονωμένων αντικειμένων που απαρτίζουν τη σκηνή και καταλήγει στην δισδιάστατη προβαλλόμενη εικόνα που την αναπαριστά στο εκάστοτε μέσο, είναι κοινή και αναφέρεται συχνά με το συνολικό όρο *Ροή Εργασιών Γραφικών* (*Graphics Pipeline*) ή και *Ροή Εργασιών Απεικόνισης* (*Rendering Pipelining*). Ο όρος *pipeline*, με την έννοια που χρησιμοποιείται εδώ, προέρχεται από τη ροή εργασιών σε μία εργοστασιακή γραμμή παραγωγής. Σε ένα τυπικό παράδειγμα μίας τέτοιας διαδικασίας, το προϊόν διατρέχει μία πορεία, συχνά σε ένα κυλιόμενο διάδρομο ή ράγες, κατά την οποία τροποποιείται και προσαρμόζεται από αυτόματες ή ανθρώπινες παρεμβάσεις που αντιπροσωπεύουν διαδοχικά *στάδια επεξεργασίας*. Ένα χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι η *επικάλυψη*, ως προς την επεξεργασία, που συμβαίνει στα προϊόντα μίας τέτοιας γραμμής παραγωγής. Ανά πάσα στιγμή, πολλά προϊόντα βρίσκονται σε διαφο-

ρετικά στάδια αυτής της διαδοχικής επεξεργασίας. Κάθε προϊόν το οποίο ολοκληρώνει ένα στάδιο επεξεργασίας, το διαδέχεται ένα επόμενο προϊόν στο ίδιο στάδιο επεξεργασίας, ενώ αυτό συνεχίζει την πορεία του στο επόμενο, ώστε, όσο αυτό είναι εφικτό, κανένα στάδιο της επεξεργασίας αυτής να μην παραμένει αδρανές.

Με τον όρο *υποσύστημα Γραφικών* νοούνται όλα τα δομικά στοιχεία ενός υπολογιστικού συστήματος που συνεισφέρουν στην επεξεργασία και προβολή του οπτικού αποτελέσματος, σε κάποιο από τα στάδια της ροής εργασιών Γραφικών. Το υλικό που αναλαμβάνει την πραγματοποίηση αυτής της επεξεργασίας μπορεί να είναι μέρος της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας γενικού σκοπού (Central Processing Unit – CPU) και η σχετική μνήμη που χρησιμοποιείται να αποτελεί μέρος της κύριας μνήμης του συστήματος (RAM). Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις, και για την εξυπηρέτηση υψηλότερων απαιτήσεων, το υλικό είναι εξειδικευμένο, διαθέτοντας τόσο μονάδα επεξεργασίας αφιερωμένη σε αυτό το σκοπό (Graphics Processing Unit – GPU), με χαρακτηριστικά υψηλής παραλληλίας που πηγάζουν από τις ανάγκες των Γραφικών, όσο και σχετική αφιερωμένη μνήμη RAM (Graphics RAM).

Η αντιστοίχιση του παραπάνω παραδείγματος, μίας γραμμής παραγωγής, με τη ροή εργασιών του υποσυστήματος Γραφικών υπονοεί ότι κάθε αλγοριθμικό δομικό του στοιχείο, επεξεργάζεται και προωθεί στο επόμενο στάδιο κάθε στοιχειώδες αντικείμενο που συμμετέχει στη σκηνή, ξεκινώντας άμεσα την επεξεργασία του επόμενου στοιχειώδους αντικειμένου. Θα εξετάσουμε στη συνέχεια τα στάδια αυτά της επεξεργασίας και το ρόλο που διαδραματίζουν στη σύνθεση του τελικού οπτικού αποτελέσματος, αξιοποιώντας όπου χρειάζεται κάποια τεχνική αντιστοιχία, την αντίστοιχη ροή εργασιών της WebGL. Στην πράξη, η ακολουθία αυτή παρουσιάζει επικαλύψεις και τροποποιήσεις ανάλογα με τις δυνατότητες του εκάστοτε συστήματος και τις απαιτήσεις για το τελικό οπτικό αποτέλεσμα, ωστόσο παρέχει μία βάση αναφοράς για τους αλγόριθμους και τις τεχνικές που θα περιγραφούν στα επόμενα κεφάλαια.

2.1 Μοντελοποίηση αντικειμένων

Το πρώτο στάδιο επεξεργασίας μίας σκηνής ξεκινά με τη σύλληψη και ψηφιακή καταγραφή των αντικειμένων που πρόκειται να απεικονιστούν. Στη γενική της μορφή, αυτή η καταγραφή έγκειται σε μοντέλα τριών διαστάσεων, με οπτικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά που εξυπηρετούν συγκεκριμένους σκοπούς. Το *δημιουργικό* μέρος αυτού του σταδίου, παρότι δεν εμπίπτει στην τεχνική ροή εργασιών του υποσυστήματος Γραφικών, συχνά υποστηρίζεται από μεθοδολογίες σχεδιασμού και υπολογιστικά μέσα που τις υλοποιούν και αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του αντικειμένου των Γραφικών στα πλαίσια της *μοντελοποίησης (modeling)*.

Κάτι τέτοιο διευκολύνει και την μετέπειτα εισαγωγή του παραγόμενου μοντέλου στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Για παράδειγμα, ένας σχεδιαστής προϊόντων μπορεί να καταγράψει τις πρώτες του μορφολογικές ιδέες εξ αρχής ένα περιβάλλον σχεδιασμού που θα του επιτρέψει να διαμορφώσει το αντικείμενο με βάση καλλιτεχνικές, μορφολογικές αλλά και λειτουργικές προδιαγραφές ίσως πιο εύκολα από ό,τι αν ξεκινούσε το σχεδιασμό σε ένα κομμάτι χαρτί. Στο πρώτο σενάριο, πέρα από την υπολογιστική υποστήριξη σε θέματα ελέγχου περιορισμών και εσωτερικών συσχετισμών των δομικών στοιχείων του αντικειμένου που προσφέρει ένα τέτοιο περιβάλλον, το ψηφιακό αποτέλεσμα που προκύπτει μπορεί να συνδυαστεί άμεσα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μοντελοποίησης άλλων αντικειμένων προκειμένου να συντεθεί η συνολική σκηνή στο επόμενο στάδιο επεξεργασίας.

Το στάδιο της μοντελοποίησης μεμονωμένων αντικειμένων έχει ως βασικό αποτέλεσμα τη γεωμετρική τους περιγραφή. Η περιγραφή αυτή συνήθως εκφράζεται ως σύνολο σημείων και σχετικών γεωμετρικών *στοιχειωδών αντικειμένων* (*primitives*) που ορίζονται και αναφέρονται σε ένα αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων. Το τελευταίο εξυπηρετεί αποκλειστικά το σχεδιασμό του εκάστοτε αντικειμένου αφού, σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας, δεν υπάρχει ακόμα ανάγκη τήρησης συσχετισμών με άλλα αντικείμενα και αναφέρεται συχνά ως *χώρος του μοντέλου* (*model space*) ή *χώρος του αντικειμένου* (*object space*). Σε αυτό το στάδιο, μία πολυκατοικία και ένα τραπέζι μπορούν να έχουν και τα δύο ύψος 10 μονάδων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων του χώρου τους. Η χρήση ενός περιβάλλοντος σχεδιασμού διευκολύνει σημαντικά αυτό το στάδιο και στο επίπεδο ορισμού των συντεταγμένων, επιτρέποντας τη χρήση εργαλείων που υλοποιούν περίπλοκα γεωμετρικά αντικείμενα όπως καμπύλες γραμμές και επιφάνειες. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα μοντέλο σε ψηφιακή μορφή που αναπαριστά το αντικείμενο και είναι κατάλληλο για τη συμμετοχή και προσαρμογή του σε έναν ενιαίο εικονικό κόσμο καθώς και για την επεξεργασία του από τα επόμενα στάδια της ροής εργασιών του υποσυστήματος Γραφικών.

2.2 Σύνθεση σκηνής

Το επόμενο στάδιο επεξεργασίας αφορά τη σύνθεση των μοντέλων των επιμέρους αντικειμένων σε μία ενιαία τρισδιάστατη σκηνή. Σε αυτό το στάδιο, το σύστημα συντεταγμένων είναι πια κοινό, συνεπώς, οι διαστάσεις αλλά και οι θέσεις των αντικειμένων πρέπει να συνάδουν με τους συσχετισμούς που είναι επιθυμητό να έχουν στον εικονικό κόσμο που δημιουργείται. Η προσαρμογή των επιμέρους αντικειμένων σε ένα κοινό εικονικό κόσμο μπορεί να υλοποιηθεί είτε στα πλαίσια ενός περιβάλλοντος σχεδιασμού είτε προγραμματιστικά. Και στις δύο περιπτώσεις, τα μαθηματικά εργαλεία που αξιοποιούνται για τις απαραίτητες τροποποιήσεις είναι

αυτά των μετασχηματισμών που θα δούμε αναλυτικά σε επόμενα κεφάλαια. Το κοινό σύστημα συντεταγμένων αναφέρεται στο *χώρο* του εικονικού *κόσμου* (*world space*) και θα αποτελέσει το πρώτο σύστημα αναφοράς για μία σειρά από μετατροπές ως την τελική προβολή της επιθυμητής άποψής του στην οθόνη. Σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων η πολυκατοικία και το τραπέζι του προηγούμενου παραδείγματος θα πρέπει να έχουν τη σωστή *σχέση* μεταξύ των μεγεθών και των θέσεων τους ακόμα κι αν οι απόλυτοι αριθμοί εξακολουθούν να μην παίζουν ιδιαίτερο ρόλο. Για παράδειγμα, υποθέτοντας ότι απεικονίζεται μία πολυκατοικία με πραγματικό ύψος 20 μέτρων και ένα τραπέζι με πραγματικό ύψος 1 μέτρου, το ύψος τους στον εικονικό κόσμο μπορεί, ενδεικτικά, να είναι 200 και 10 ή 1 και 0,05 αντίστοιχα. Επίσης, αν σκοπεύουμε το τραπέζι να βρίσκεται μέσα στην πολυκατοικία, αυτό θα πρέπει να αντικατοπτρίζεται χωροταξικά στις συντεταγμένες τους.

2.3 Μετασχηματισμός παρατήρησης

Το συγκεκριμένο στάδιο αποτελεί την πρώτη αλλαγή συστήματος συντεταγμένων στην πορεία προς την οθόνη. Όπως θα δούμε αναλυτικά στο σχετικό κεφάλαιο, προσδιορίζεται η θέση και ο προσανατολισμός του παρατηρητή ώστε να αποτυπωθεί, στη συνέχεια, ο εικονικός κόσμος από αυτήν την οπτική. Οι παράμετροι αυτές της θέσης και του προσανατολισμού του παρατηρητή ορίζονται ως συντεταγμένες του κόσμου των αντικειμένων. Στη συνέχεια, οι συντεταγμένες των αντικειμένων προσαρμόζονται στο νέο σύστημα του *χώρου του παρατηρητή* (*view space*) χωρίς να αλλάξουν οι μεταξύ τους συσχετισμοί αφού η προσαρμογή αφορά μόνο την οπτική από την οποία παρατηρούμε τον εικονικό κόσμο. Η αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων γίνεται και πάλι με τη βοήθεια των κατάλληλων μετασχηματισμών και, τυπικά, η θέση του παρατηρητή αντιπροσωπεύει τη νέα αρχή των αξόνων με προσανατολισμό των αξόνων που, κατά σύμβαση, υπαγορεύεται μονοσήμαντα από τις παραμέτρους της θέσης του και του προσανατολισμού του.

2.4 Περικοπή & Προβολή

Η τελική προβολή τμήματος του εικονικού κόσμου στην οθόνη υπονοεί τη γεωμετρική προβολή του σε ένα επίπεδο που διαδραματίζει το ρόλο της οθόνης. Για τη ρεαλιστικότερη απεικόνιση ενός εικονικού κόσμου, συχνά η προβολή αυτή στο επίπεδο γίνεται με κανόνες που θυμίζουν τον τρόπο που αντικρύζουμε τον πραγματικό κόσμο. Πρόκειται για την *προοπτική προβολή* (*perspective projection*) σύμφωνα με την οποία ένα αντικείμενο με δεδομένο μέγεθος εμφανίζεται μικρότερο όσο απομακρύνεται από τον παρατηρητή. Προκειμένου η αρχή αυτή να εφαρμοστεί στην προβολή των αντικειμένων στην οθόνη, μετά την τοποθέτηση του παρατηρητή στο

προηγούμενο στάδιο, καθορίζεται το ορατό τμήμα του κόσμου και οι απαραίτητες παράμετροι της προοπτικής προβολής ώστε το σύστημα συντεταγμένων να προσαρμοστεί εκ νέου.

2.4.1 Περικοπή (Clipping)

Έχοντας καθορίσει το ορατό τμήμα του κόσμου, το υποσύστημα Γραφικών είναι αρχικά σε θέση να προχωρήσει στην περικοπή (*ψαλίδισμα* – *clipping*) αντικειμένων και τμημάτων τους που δεν εμπίπτουν σε αυτό. Αυτό είναι επιθυμητό για την εξοικονόμηση υπολογιστικού κόστους, ώστε τα αντικείμενα αυτά να μη συμμετέχουν στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Η απόρριψη και περικοπή αντικειμένων σε αυτό το στάδιο γίνεται με αλγορίθμους που θα δούμε αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια σε έναν ενδιάμεσο χώρο, τον λεγόμενο, λόγω της λειτουργίας αυτής, χώρο περικοπής (*clip space*) που αντιπροσωπεύει το ορατό τμήμα του χώρου του παρατηρητή πριν την κανονικοποίησή του.

2.4.2 Προοπτική Προβολή

Οι συντεταγμένες όσων αντικειμένων περιέχονται πλήρως ή εν μέρει στο ορατό μέρος του κόσμου, προσαρμόζονται ακόμα μία φορά, ώστε να οδηγηθούμε στον *κανονικοποιημένο χώρο της οθόνης* (*normalized screen space*) αυτή τη φορά. Η πιθανή εφαρμογή προοπτικής προβολής κατά την προσαρμογή αυτή επιτρέπει στις νέες αυτές συντεταγμένες να αντικατοπτρίζουν πια και τις φαινόμενες αλλαγές μεγέθους σε σχέση με την απόσταση από τον παρατηρητή. Αυτό σημαίνει ότι μετά από το μετασχηματισμό προοπτικής προβολής, αντικείμενα που, για παράδειγμα, είχαν ίδιες διαστάσεις αλλά διαφορετική απόσταση από τον παρατηρητή, *δεν έχουν πια τις ίδιες διαστάσεις*: το μέγεθός τους αντικατοπτρίζει την απόστασή τους από τον παρατηρητή. Αυτό είναι επιθυμητό γιατί στο τελικό στάδιο της προβολής τους στην οθόνη, οι συντεταγμένες (x,y) των κορυφών τους χρησιμοποιούνται, με απλή προσαρμογή στην ανάλυση της οθόνης, για την επιλογή του *υποψήφιου εικονοστοιχείου* προβολής τους στην οθόνη ενώ η συντεταγμένη z , κατάλληλα τροποποιημένη, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο επικαλύψεων μεταξύ τους. Ακόμα κι αν δεν εφαρμοστεί προοπτική προβολή, οι συντεταγμένες των αντικειμένων στο χώρο της οθόνης είναι πια *κανονικοποιημένες*, εκτείνονται δηλαδή από -1 ως 1 σε όλες τις διαστάσεις, ώστε κατά την τελική προβολή τους στην οθόνη, στα επόμενα στάδια να είναι εύκολη η προσαρμογή τους στην εκάστοτε επιθυμητή ανάλυση.

2.5 Rasterization (Κβάντιση)

Σε αυτό το στάδιο τα γεωμετρικά αντικείμενα που απαρτίζουν τη σκηνή μας κβαντίζονται ώστε να απεικονιστούν στα διαθέσιμα εικονοστοιχεία της οθόνης. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως rasterization (κβάντιση) με αναφορά στον *κάνναβο* (*raster*), το *πλέγμα/σκελετό* που χρησιμοποιείται στη ζωγραφική είτε στο τελικό μέσο καταγραφής της εικόνας είτε και ως παράθυρο, μέσα από το οποίο αντικρύζει ο ζωγράφος τη σκηνή ώστε να διευκολύνεται η τμηματική καταγραφή της.

Η πληροφορία μέσω της οποίας ορίζονται τα γεωμετρικά αντικείμενα, όπως είναι οι συντεταγμένες των κορυφών που ορίζουν ένα τρίγωνο, αξιοποιείται στο στάδιο αυτό για την παραγωγή της ενδιαμέσης πληροφορίας που δεν υπάρχει αλλά υπονοείται στα αρχικά μοντέλα. Για παράδειγμα, για ένα τρίγωνο που ορίζεται από τις τρεις κορυφές του, μετά τα προηγούμενα στάδια, είναι πια γνωστά τα (x,y) στα οποία (πιθανόν, ανάλογα με τις επικαλύψεις κλπ. με άλλα αντικείμενα) θα απεικονιστούν αυτές οι κορυφές στην οθόνη. Με βάση αυτές, υπολογίζονται όλα τα επιμέρους υποψήφια εικονοστοιχεία που θα αναλάβουν την απεικόνιση της συνολικής επιφάνειας αυτού του τριγώνου. Δεδομένου ότι αυτά τα επιμέρους *υποψήφια* εικονοστοιχεία (όπως και οι ίδιες οι κορυφές) δεν είναι σίγουρο ότι θα εμφανιστούν τελικά στην οθόνη, αναφέρονται συχνά με τον όρο *fragments* ώστε να είναι σαφής η διάκριση σε σχέση με τα τελικά εικονοστοιχεία της οθόνης. Η κβάντιση του αντικειμένου σε *fragments* αφορά όχι μόνο τον καθορισμό των *συντεταγμένων* που αντιστοιχούν σε αυτά τα ενδιαμέσα σημεία της επιφάνειάς του, αλλά και άλλων πληροφοριών που πηγάζουν από τις αντίστοιχες πληροφορίες των κορυφών που το ορίζουν. Μία τέτοια πληροφορία είναι το *χρώμα*, που μπορεί να υπονοείται από το χρώμα της κάθε κορυφής που ορίζει το αντικείμενο, οδηγώντας στο χρώμα για κάθε σημείο της επιφάνειάς του και, συνακόλουθα, για κάθε αντίστοιχο *fragment*. Σε αυτήν την περίπτωση, η απόσταση κάθε σημείου της επιφάνειας του αντικειμένου από τις κορυφές που το ορίζουν, οδηγεί στον υπολογισμό του χρώματος μέσω *παρεμβολής* (*interpolation*) των χρωμάτων των κορυφών του. Το τελικό χρώμα του εικονοστοιχείου μπορεί να λάβει υπόψη επιπλέον πληροφορίες, όπως ο φωτισμός, ο βαθμός διαφάνειας του αντικειμένου, οι επικαλύψεις με άλλα αντικείμενα, κλπ., στα αντίστοιχα στάδια της ροής εργασιών Γραφικών.

Ο όρος *raster* έχει πια ισχυρή σύνδεση με τη σημασία του στο πεδίο των Γραφικών Υπολογιστών. Σε αυτό το πλαίσιο χρησιμοποιείται συχνά για να υποδηλώσει και την περιγραφή μίας σκηνής αναλυτικά ως εικόνας ανά εικονοστοιχείο (*raster image*), σε αντίθεση με την περιγραφή της μέσω του ορισμού ιδιοτήτων γεωμετρικών αντικειμένων (*vector image*). Μετά από το στάδιο του rasterization αναφέρεται συχνά ότι βρισκόμαστε πια στο χώρο της εικόνας (*image space*) σε αντίθεση με το

χώρο των γεωμετρικών αντικειμένων στον οποίο εργαζόμασταν μέχρι το προηγούμενο στάδιο (*vector space*).

2.6 Υφή

Η καταγραφή των χρωμάτων που αποφασίζονται για κάθε εικονοστοιχείο γίνεται στον *καταχωρητή χρώματος (color buffer)*, ενός πίνακα του οποίου κάθε κελί αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο της οθόνης και περιέχει τη χρωματική πληροφορία του. Μία εικόνα υφής (*texture*) χρησιμοποιείται για να δώσει την οπτική εντύπωση μίας πολύπλοκης επιφάνειας σε ένα συγκριτικά απλούστερο γεωμετρικό αντικείμενο. Επειδή η εικόνα υφής αντιστοιχίζεται αρχικά στις κορυφές του εκάστοτε αντικειμένου, η απόσταση του κάθε σημείου της επιφάνειας του αντικειμένου από τις κορυφές που το ορίζουν, εδώ καθοδηγεί τη *δειγματοληψία* της εικόνας. Με αυτόν τον τρόπο, το χρώμα κάθε σημείου της επιφάνειας του αντικειμένου καθορίζεται, σε αυτήν την περίπτωση, από το αντίστοιχο σημείο της εικόνας υφής. Πρακτικά, το στάδιο αυτό συνήθως λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με το προηγούμενο. Μία εικόνα υφής μπορεί, ωστόσο, να κωδικοποιήσει και άλλου είδους πληροφορία, με κάθε της εικονοστοιχείο να επιδρά στο φωτισμό ή και στη γεωμετρία του σημείου που αντιστοιχεί στο εκάστοτε αντικείμενο.

2.7 Φωτισμός και Σκίαση

Σε αυτό το στάδιο λαμβάνουν χώρα τοπικοί υπολογισμοί που σχετίζονται με τον επιμέρους φωτισμό των σημείων της επιφάνειας του αντικειμένου. Η σχέση του με τις πηγές φωτισμού, οι ιδιότητές του και η αλληλεπίδρασή του με άλλα αντικείμενα επηρεάζουν το τελικό χρωματικό αποτέλεσμα για κάθε σημείο του. Ο υπολογισμός του φωτισμού για το σύνολο της επιφάνειας του αντικειμένου (συχνά αναφέρεται ως *σκίαση – shading*) εκκινεί από τη θέση των κορυφών που το ορίζουν σε σχέση με τις πηγές φωτισμού και με τα άλλα αντικείμενα της σκηνής. Η πληροφορία των κορυφών κβαντίζεται μέσω παρεμβολής στα *fragments*, ωστόσο, η απαίτηση για ρεαλιστικότερη απεικόνιση οδηγεί συχνά στην επεξεργασία θεμάτων φωτισμού ανά *fragment*, σε αυτό το στάδιο, με την αντίστοιχη υπολογιστική επιβάρυνση.

Η ελεγχόμενη επεξεργασία και σχεδίαση ανά εικονοστοιχείο μπορεί να εκμεταλλευτεί ακόμα έναν πίνακα με 1-προς-1 αντιστοιχία με τα εικονοστοιχεία της οθόνης: τον *καταχωρητή stencil (stencil buffer)*. Ο τελευταίος μπορεί να αξιοποιηθεί για το καθορισμό περιοχών της οθόνης όπου, για παράδειγμα, δε θέλουμε να σχεδιαστεί ένα αντικείμενο παρότι γεωμετρικά τις καλύπτει. Κάτι τέτοιο μπορεί να φανεί χρήσιμο για τη οπτική υλοποίηση σκιάς. Ο καταχωρητής *stencil* θεωρείται και αυτός, μαζί με τον καταχωρητή χρώματος, μέρος του *καταχωρητή πλαισίου (frame buffer)*.

2.8 Καταπολέμηση ειδωλισμού

Η έννοια του ειδωλισμού (aliasing) αναφέρεται στην καταγραφή ή απεικόνιση φαινομένων, αντικειμένων κλπ., συνήθως μέσω δειγματοληψίας, με τρόπο που οδηγεί σε αποτέλεσμα με διαφορετικά χαρακτηριστικά από το αυθεντικό. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι το βίντεο ενός ιπτάμενου ελικοπτέρου που φαίνεται να αιωρείται με ακίνητο έλικα, επειδή η λήψη εικόνων για το βίντεο με ρυθμό που συμπτωματικά καταγράφει πάντα τον έλικα στην ίδια θέση. Στα Γραφικά, η απεικόνιση των γεωμετρικών αντικειμένων του μοντέλου, που ορίζονται με μαθηματικό τρόπο π.χ. από λεία ευθύγραμμα τμήματα, στα διακριτά εικονοστοιχεία της οθόνης, οδηγεί συχνά στην απεικόνισή τους με *οδοντωτές ακμές* (*jagged edges*) και το οπτικό αποτέλεσμα αυτό υπάγεται στην κατηγορία φαινομένων ειδωλισμού. Οι τεχνικές *καταπολέμησης του ειδωλισμού* (*anti-aliasing techniques*) εφαρμόζονται σε αυτό το στάδιο ώστε το φαινόμενο των οδοντωτών ακμών να εξομαλυνθεί μέσω συν-επεξεργασίας και κατάλληλου χρωματισμού των γειτονικών τους εικονοστοιχείων.

2.9 Έλεγχος βάθους

Στο στάδιο του ελέγχου βάθους ελέγχονται για επικαλύψεις τα υποψήφια εικονοστοιχεία που αντιστοιχούν σε διαφορετικά αντικείμενα, ώστε να εντοπιστεί και να απεικονιστεί τελικά το πλησιέστερο στην οθόνη. Για τη λειτουργία αυτή, χρησιμοποιείται ακόμα μία δομή πίνακα, της οποίας κάθε κελί επίσης αντιστοιχεί σε ένα εικονοστοιχείο της οθόνης, ο *καταχωρητής βάθους* (*depth buffer*). Ο τελευταίος αναφέρεται συχνά και ως *z-buffer* αφού καταγράφει την πληροφορία του βάθους, δηλαδή την απόσταση του αντικειμένου από την οθόνη: στον κανονικοποιημένο χώρο της οθόνης η πληροφορία αυτή αντιπροσωπεύεται από τη συντεταγμένη *z* του σχετικού σημείου. Και ο καταχωρητής βάθους θεωρείται, μαζί με τους καταχωρητές χρώματος και stencil, επιμέρους στοιχείο του συνολικού καταχωρητή πλαισίου. Πρακτικά, για κάθε εικονοστοιχείο της οθόνης, ανά πάσα στιγμή, υπάρχει καταγεγραμμένο στον καταχωρητή χρώματος το χρώμα του κοντινότερου αντικειμένου που *διεκδικεί* αυτό το εικονοστοιχείο και στον καταχωρητή βάθους το βάθος αυτού του κοντινότερου αντικειμένου, για το συγκεκριμένο σημείο του. Δεδομένου ότι ένα αντικείμενο γενικά δεν έχει την ίδια απόσταση από την οθόνη σε όλη του την έκταση, η πληροφορία του βάθους για ένα αντικείμενο δεν είναι σταθερή σε όλα τα εικονοστοιχεία που αυτό καλύπτει.

Βρισκόμαστε πια στο χώρο της εικόνας και η επεξεργασία αφορά fragments και εικονοστοιχεία, αλλά τεχνικές απόκρυψης υπάρχουν και εφαρμόζονται και στο χώρο των γεωμετρικών αντικειμένων, σε προηγούμενα στάδια. Σε κάθε περίπτωση,

στόχος είναι η μείωση των επεξεργαστικών απαιτήσεων για την τελική οπτικοποίηση της σκηνής, συνεπώς, οποιαδήποτε δυνατότητα υπάρχει, σε προηγούμενο στάδιο, περιορισμού των δεδομένων που θα διοχετευτούν στα επόμενα αξιοποιείται όσο αυτό είναι εφικτό.

2.10 Ανάμειξη

Η υλοποίηση κάποιου βαθμού διαφάνειας απαιτεί το χρωματισμό εικονοστοιχείων λαμβάνοντας υπόψη το χρώμα περισσότερων αντικειμένων από ένα. Σε αυτήν την περίπτωση, για το χρωματισμό αξιοποιείται το κανάλι *άλφα* (*alpha channel*) που καταδεικνύει το μέτρο της *αδιαφάνειας* του χρώματος του σημείου του αντικειμένου και μπορεί να προέρχεται είτε από τις χρωματικές ιδιότητες των κορυφών του είτε από το αντίστοιχο σημείο της εικόνας υφής. Για τον υπολογισμό του τελικού χρώματος είναι απαραίτητη η *ανάμειξη* (*blending*) του χρώματος που αποφασίζεται για το εκάστοτε fragment του αντικειμένου με το χρώμα που έχει ήδη υπολογιστεί για το σχετικό εικονοστοιχείο.

2.11 Προβολή στην οθόνη

Το τελικό αποτέλεσμα όλων των προηγούμενων σταδίων είναι η προβολή της εικόνας που υπολογίστηκε στην οθόνη. Σε αυτό το στάδιο, το χρώμα των κελιών του καταχωρητή χρώματος απεικονίζεται στα αντίστοιχα εικονοστοιχεία της οθόνης. Συχνά, το αποτέλεσμα της ροής εργασιών που περιγράφηκε εμφανίζεται σε ένα προεπιλεγμένο *viewport*, δηλαδή σε ένα τμήμα της οθόνης του συστήματος που ταυτόχρονα πιθανόν απεικονίζει και άλλα στοιχεία, για παράδειγμα, στοιχεία της γραφικής διεπαφής ή το φόντο του ίδιου του παραθύρου που φιλοξενεί το *viewport*. Σε αυτήν την περίπτωση, οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων που υπολογίστηκαν αφορούν το *viewport* και προσαρμόζονται κατάλληλα ώστε τα χρώματα των εικονοστοιχείων που υπολογίστηκαν να τοποθετηθούν στον τελικό *καταχωρητή σχεδίασης* (*drawing buffer*) του συστήματος, στις κατάλληλες θέσεις και με ενημερωμένη την πληροφορία αδιαφάνειας σε περίπτωση τελικής ανάμειξής τους με το φόντο του παραθύρου. Κατά σύμβαση, οι συντεταγμένες των εικονοστοιχείων ξεκινούν με το (0,0) επάνω-αριστερά στην οθόνη και αυξάνονται ως προς x προς τα δεξιά και ως προς y προς τα κάτω.

2.12 Τεχνολογίες Γραφικών

Την υλοποίηση των παραπάνω σταδίων αναλαμβάνει το υποσύστημα Γραφικών του εκάστοτε υπολογιστικού συστήματος σε συνεργασία με τον προγραμματιστή/χρήστη του. Ανάλογα με τις απαιτήσεις μας, τις γνώσεις μας και τις δυνατότητες της πλατφόρμας που χρησιμοποιούμε, μπορούμε να παρέμβουμε σε κάποια από τα παραπάνω στάδια αυτής της ροής ώστε να ελέγξουμε το τελικό οπτικό αποτέλεσμα. Στη συνέχεια συνοψίζονται οι κυριότερες τεχνολογίες λογισμικού που μπορούμε να αξιοποιήσουμε για τον έλεγχο του περιεχομένου του οπτικού αποτελέσματος και των εργασιών που το υπολογίζουν.

2.12.1 APIs Προγραμματισμού Γραφικών

Μία Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών (Application Programming Interface - API) Γραφικών, ένα Graphics API, αποτελεί τον αμεσότερο τρόπο ελέγχου του υλικού Γραφικών του εκάστοτε υπολογιστικού συστήματος. Πρόκειται για την υλοποίηση της προγραμματιστικής δυνατότητας να συμπεριλάβουμε στοιχεία Γραφικών στις εφαρμογές μας, με προκαθορισμένους τρόπους που υλοποιούνται μέσω των αντικειμένων του API, προσφέροντας στοχευμένο και λεπτομερή έλεγχο των περισσότερων υπηρεσιών που προσφέρει το υποσύστημα Γραφικών. Η χρήση τους τυπικά ενσωματώνεται σε μία εφαρμογή που αναπτύσσεται σε μία από τις καθιερωμένες γλώσσες προγραμματισμού, με την τελευταία να αναλαμβάνει το υποστηρικτικό μέρος του κώδικα, λειτουργίες που δε σχετίζονται με το χειρισμό του υλικού Γραφικών και τις διαδικασίες ολοκλήρωσης της προγραμματιστικής διαδικασίας.

Ο κύριος εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής είναι η OpenGL (Open Graphics Language), ένα ανοικτό πρότυπο για ένα API Γραφικών για ανάπτυξη μεμονωμένων (stand-alone) εφαρμογών με διείσδυση σε όλες τις κύριες πλατφόρμες ανάπτυξης λογισμικού (FreeBSD, Linux, MacOS, Windows). Η OpenGL αποτελεί προϊόν συνεργασίας ενός αριθμού ενδιαφερομένων μερών του τομέα και η πλειοψηφία κατασκευαστών υλικού Γραφικών έχουν υλοποιήσει το πρότυπο, προσφέροντας έλεγχο στο υλικό με τρόπο που το πρότυπο καθορίζει. Ειδικά για την πλατφόρμα Windows, ένα αντίστοιχο API για υποστήριξη προγραμματισμού Γραφικών σε μεμονωμένες εφαρμογές είναι το Direct3D, μέρος του DirectX API της Microsoft που υποστηρίζει το σύνολο των πολυμεσικών λειτουργιών (ήχο, βίντεο, κλπ.). Σε αντίθεση με την OpenGL, το Direct3D είναι ένα ιδιωτικό (proprietary) πρότυπο που υποστηρίζεται και διατίθεται μόνο σε συστήματα Windows.

Ένα υποσύνολο της OpenGL, η OpenGL-ES (Embedded Systems) έχει προταθεί και υλοποιηθεί για την υποστήριξη αντίστοιχων δυνατοτήτων σε φορητές συσκευές.

Η WebGL, που παρουσιάζεται στο δεύτερο μέρος του παρόντος βιβλίου, είναι βασισμένη στην OpenGL-ES και προσφέρει αντίστοιχες δυνατότητες προγραμματισμού Γραφικών στο περιβάλλον ενός φυλλομετρητή ιστού (web browser). Όλες οι παραπάνω εκδοχές, συνεργάζονται και υποστηρίζουν μία εκδοχή της GLSL (GL Shader Language) για τον απευθείας προγραμματιστικό έλεγχο της GPU.

Το Vulkan αποτελεί μία σχετικά πρόσφατη εκδοχή της οικογένειας της OpenGL, για ένα ανοικτό πρότυπο Graphics API με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης, χρησιμοποιώντας χαμηλότερου προγραμματιστικού επιπέδου εντολές για αυξημένες δυνατότητες ελέγχου της κατανομής φόρτου στο υλικό: η υποστήριξή του από τους κατασκευαστές υλικού Γραφικών επεκτείνεται σταδιακά. Μία ανάλογου τεχνικού σκεπτικού προσπάθεια, αλλά με proprietary υποστήριξη, είναι το Metal από την Apple.

Κλείνοντας αυτήν την αναφορά, αξίζει να συμπεριλάβουμε εδώ και το πρότυπο της HTML5 η οποία υποστηρίζεται πια από την πλειοψηφία των σύγχρονων browsers και προσφέρει, μέσω του στοιχείου canvas, τη δυνατότητα σχεδίασης Γραφικών στα πλαίσια μίας ιστοσελίδας, είτε δύο διαστάσεων, μέσω του σχετικού 2D API, είτε τριών διαστάσεων, αξιοποιώντας τη WebGL.

2.12.2 Βιβλιοθήκες Προγραμματισμού Γραφικών

Η εγγύτητα στο υλικό, που προσφέρουν τα παραπάνω APIs προγραμματισμού Γραφικών, εξασφαλίζει ευελιξία και αυξημένο έλεγχο στην αξιοποίηση των δυνατοτήτων του. Ωστόσο εισάγει κι ένα βαθμό πολυπλοκότητας που πολλές φορές δεν είναι επιθυμητός ή αναγκαίος στα πλαίσια της ανάπτυξης μίας συγκεκριμένης εφαρμογής. Προκειμένου να καλυφθεί μέρος αυτής της πολυπλοκότητας, έχουν αναπτυχθεί βιβλιοθήκες που ομαδοποιούν και απλοποιούν κάποιες λειτουργίες των παραπάνω APIs, προσφέροντας έτσι έναν πιο προσβάσιμο τρόπο προγραμματισμού Γραφικών.

Ένας τυπικός εκπρόσωπος μίας τέτοιας βιβλιοθήκης είναι η three.js, μία βιβλιοθήκη Javascript για Γραφικά σε browser. Προσφέρει ένα ρεπερτόριο λειτουργιών υψηλότερου προγραμματιστικού επιπέδου που διευκολύνουν τον προγραμματιστή και που μεταφράζονται σε κλήσεις του WebGL API για την εκτέλεσή τους. Μία ανάλογη αντιστοίχιση, σε μεγαλύτερο εύρος λειτουργιών που συνήθως αντιπροσωπεύεται από τον όρο toolkit, προσφέρει η freeglut, ως μετεξέλιξη της GLUT, σε σχέση με την OpenGL αλλά και η glfw.

2.12.3 Εφαρμογές μοντελοποίησης

Η δημιουργία μοντέλων τριών διαστάσεων αποτελεί το σημαντικό πρώτο βήμα για τη σύνθεση τρισδιάστατων σκηνών. Ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής, έχει αναπτυχθεί ένα ευρύ φάσμα εκπροσώπων λογισμικού αυτού του τύπου που συνήθως δεν περιορίζονται στην κατασκευή του μοντέλου αλλά περιλαμβάνουν και τα επόμενα στάδια οπτικοποίησής του με στοιχεία προβολής, φωτισμού κλπ. Τυπικός εκπρόσωπος τέτοιας εφαρμογής είναι το Blender, ένα ελεύθερο λογισμικό ανοικτού κώδικα που υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών που περιλαμβάνουν τη σύνθεση τρισδιάστατων μοντέλων και υφής, το animation, την αλληλεπίδραση με το χρήστη κλπ. Στο εμπορικό πεδίο, ένας ενδεικτικός εκπρόσωπος είναι το AutoCAD και η σχετική γκάμα εφαρμογών, που αναφέρεται σε τεχνικά σχέδια, αλλά υποστηρίζει πια, πέρα από τα τυπικά στοιχειώδη αντικείμενα για τη σύνθεσή τους, ένα μεγάλο ρεπερτόριο έτοιμων ή παραμετροποιημένων αντικειμένων και τη ροή εργασιών για τη φωτορεαλιστική απεικόνισή τους.

Ένα ισχυρό σημείο τέτοιων εφαρμογών είναι οι δυνατότητες επέκτασης που προσφέρουν πέρα από τις λειτουργίες που είναι άμεσα διαθέσιμες μέσω της γραφικής διεπαφής τους. Συγκεκριμένα, παρέχουν το δικαίωμα προγραμματιστικού ελέγχου των αντικειμένων που σχεδιάζονται, επιτρέποντας έτσι το χειρισμό και την παρουσίασή τους με τρόπους που μπορούν να οριστούν δυναμικά, συνδυάζοντας ως ένα βαθμό την ευελιξία του προγραμματισμού Γραφικών με τις αυξημένες δυνατότητες μοντελοποίησης που προσφέρουν.

2.12.4 Game Engines

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη των προσωπικών υπολογιστών έχει επιτρέψει την υποστήριξη όλου του φάσματος των εργασιών που απαιτούνται στα πλαίσια της ανάπτυξης ενός παιχνιδιού για υπολογιστή. Τέτοιες ολοκληρωμένες πλατφόρμες, γνωστές με τον όρο Game Engines, περιλαμβάνουν λειτουργίες που σχετίζονται με τη σύνθεση της σκηνής, με τη φυσική που υπακούν τα αντικείμενα που αυτή περιλαμβάνει, με τη λογική που επιστρατεύεται στα πλαίσια του εκάστοτε παιχνιδιού, κλπ. Σε αυτά τα περιβάλλοντα, η μοντελοποίηση δεν είναι αυτοσκοπός και συνήθως τα αντικείμενα που συνθέτουν τις σκηνές εισάγονται μετά το σχεδιασμό τους σε κάποιο άλλο περιβάλλον, πιθανότατα σε κάποια από τις εφαρμογές μοντελοποίησης της κατηγορίας της προηγούμενης ενότητας. Όπως είναι αναμενόμενο σε μία πλατφόρμα ανάπτυξης παιχνιδιών, υπάρχει κι εδώ η δυνατότητα προγραμματιστικού ελέγχου των γραφικών αλλά και άλλων αντικειμένων της σκηνής. Τα γεωμετρικά μοντέλα, οι εικόνες που χρησιμοποιούνται στον εικονικό κόσμο αλλά και

οι ήχοι και άλλα είδη αντικειμένων που αξιοποιούνται σε ένα παιχνίδι είναι γνωστά και με το όνομα assets (πόροι) σε ένα τέτοιο περιβάλλον.

Τυπικοί εκπρόσωποι αυτής της κατηγορίας εφαρμογών είναι το Unity και το Unreal. Πρόκειται για εφαρμογές που ξεκίνησαν σε εμπορικό επίπεδο αλλά πια είναι διαθέσιμες, τουλάχιστον σε κάποια μορφή και με κάποιες προϋποθέσεις, ως ελεύθερο λογισμικό. Τέτοιες εφαρμογές, παρότι εκτείνονται πέρα από τα όρια των Γραφικών, αποτελούν κατεξοχήν παραδείγματα των δυνατοτήτων των σύγχρονων τεχνικών και συστημάτων που σχετίζονται με αυτά. Η δυνατότητα σύνθεσης ενός πολύπλοκου εικονικού κόσμου και σχετικών λειτουργιών εξερεύνησής του μπορούν να δώσουν το έναυσμα για τη διερεύνηση των σχετικών αλγορίθμων και μηχανισμών και να προκαλέσουν το ενδιαφέρον για περαιτέρω ενασχόληση με το θέμα.