



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Μελέτη αλγορίθμων για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση
τρισδιάστατου χαρακτήρα για βιντεοπαιχνίδια**

Διπλωματική Εργασία

Πέτσης Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα: Παναγιώτα Τσομπανοπούλου

Σεπτέμβριος 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

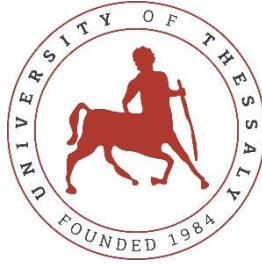
**Μελέτη αλγορίθμων για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση
τρισδιάστατου χαρακτήρα για βιντεοπαιχνίδια**

Διπλωματική Εργασία

Πέτσης Κωνσταντίνος

Επιβλέπουσα: Παναγιώτα Τσομπανοπούλου

Σεπτέμβριος 2024



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Study of algorithms for the design and implementation of a 3D
character for video games**

Diploma Thesis

Petsis Konstantinos

Supervisor: Panagiota Tsompanopoulou

September 2024

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπουσα

Παναγιώτα Τσομπανοπούλου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Μιχαήλ Βασιλακόπουλος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Αθανάσιος Φεύγας

Μέλος Ε.ΔΙ.Π., Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Πέτσης Κωνσταντίνος

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Petsis Konstantinos

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κυρία Παναγιώτα Τσομπανοπούλου, για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της υλοποίησης και της συγγραφής αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπόλοιπους επιβλέποντες καθηγητές μου, κύριο Μιχαήλ Βασιλακόπουλο και κύριο Αθανάσιο Φεύγα για τη συμβολή τους.

Τέλος, θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω εγκάρδια τα μέλη της οικογένειάς μου για την πολύτιμη υποστήριξη, συζήτηση και παρότρυνση που μου παρείχαν ανιδιοτελώς σε κάθε στιγμή της δημιουργίας αυτής της εργασίας.

Μελέτη αλγορίθμων για το σχεδιασμό και την υλοποίηση τρισδιάστατου χαρακτήρα για βιντεοπαιχνίδια

Πέτσης Κωνσταντίνος

Περίληψη

Με την τεράστια ανάπτυξη της βιομηχανίας των βιντεοπαιχνιδιών, ο τομέας της σχεδίασης των επιμέρους στοιχείων που απαιτούνται για την ολοκληρωμένη ανάπτυξη και την τελική κυκλοφορία του προϊόντος-παιχνιδιού στην αγορά έχει ανθίσει ιδιαίτερα δημιουργώντας νέες θέσεις εργασίας. Οι σχεδιαστές των βιντεοπαιχνιδιών καλούνται να αναζητήσουν και να εφαρμόσουν νέες μεθόδους και αλγορίθμους για την αποδοτικότερη και ευκολότερη σχεδίαση των χαρακτήρων που θα πρωταγωνιστήσουν στα παιχνίδια τους κάνοντας τα βιντεοπαιχνίδια αυτά πιο ελκυστικά για το κοινό. Πλήθος τεχνικών χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός χαρακτήρα βιντεοπαιχνιδιού, από την τρισδιάστατη σχεδίαση μέχρι τη ρεαλιστική κίνησή του και τις υφές των υλικών της ενδυμασίας του και της εμφάνισής του.

Εκ πρώτης όψεως, ο ρόλος των βιντεοπαιχνιδιών σήμερα είναι κυρίως ψυχαγωγικός. Ωστόσο, ο ρόλος τους μπορεί να γίνει και εκπαιδευτικός καθώς πολλά παιχνίδια ενσωματώνουν στο σενάριό τους ιστορικά στοιχεία με σκοπό ο παίκτης να αισθανθεί πως βρίσκεται μέσα στον κόσμο του ψηφιακού παιχνιδιού.

Στην παρούσα εργασία, στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγή στο θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και μια ιστορική αναδρομή στην τεχνολογία δημιουργίας των πρώτων βιντεοπαιχνιδιών. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται μερικά επιτυχημένα παιχνίδια και κάποια στατιστικά στοιχεία. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται το λογισμικό μοντελισμού 3D Blender. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται τα διαφορετικά στάδια σχεδίασης μοντελισμού όπως και οι κοινές τεχνικές που χρησιμοποιούν οι μοντελιστές. Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται ένα άλλο στάδιο της υλοποίησης ενός χαρακτήρα για βιντεοπαιχνίδια που είναι η δημιουργία υλικών-υφών για τα διάφορα μέρη που τον αποτελούν όπως δέρμα,

μαλλιά, ρούχα, πανοπλία κ.α. για την επίτευξη ενός ρεαλιστικού αποτελέσματος. Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι φωτισμού και σκίασης που χρησιμοποιούν οι ειδικοί. Στο Κεφάλαιο 7 περιγράφεται η δημιουργία ενός σκελετού και οι μέθοδοι εφαρμογής κίνησης του. Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται αναλυτικά οι ενέργειες δημιουργίας ενός τρισδιάστατου μοντέλου του Αχιλλέα της Ομήρου Ιλιάδας και η υλοποίηση ενός μικρού παιχνιδιού στην πλατφόρμα της Unity. Για την υλοποίηση του χαρακτήρα, χρησιμοποιήθηκαν λογισμικά ανοιχτού κώδικα όπως το Blender, το Gimp, το Photoshop, το Instant Meshes, η πλατφόρμα Unity και η διαδικτυακή εφαρμογή Mixamo.com. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το κόστος δημιουργίας του χαρακτήρα ήταν μηδενικό αφού για τη χρήση αυτών των λογισμικών δεν χρειάζεται κάποια οικονομική συνδρομή. Λόγω της έλλξης του νεανικού κοινού με τα παιχνίδια πάλης (fighting games) καθώς και της δυνατότητας γνωριμίας με πρόσωπα της Ιστορίας, επιλέχθηκε ο ήρωας της Ιλιάδας του Ομήρου, ο Αχιλλέας ως ο χαρακτήρας σχεδίασης, με σκοπό την προτροπή των παικτών να εντρυφήσουν περισσότερο στην ελληνική μυθολογία μαθαίνοντας νέες πληροφορίες. Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα μελέτη και γίνεται αναφορά στις μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

Λέξεις-κλειδιά:

Βιομηχανία βιντεοπαιχνιδιών, Βιντεοπαιχνίδια, σχεδιαστές βιντεοπαιχνιδιών, ανάπτυξη βιντεοπαιχνιδιών, χαρακτήρες βιντεοπαιχνιδιών, 3D design, αλγόριθμοι, τεχνικές, Blender, Unity, Gimp, Αχιλλέας

Study of algorithms for the design and implementation of 3D character for video games

Petsis Konstantinos

Abstract

With the enormous growth of the video game industry, the field of designing the individual components required for the complete development and final release of the game product has flourished particularly creating new jobs. Video game designers are asked to search and implement new methods and algorithms for more efficient and easier design of the characters that will star in their games, making these video games more attractive to the public. A multitude of techniques are used to create a video game character, from 3D design to their realistic movement and the textures of the materials of their clothing and appearance.

At first glance, the role of video games today is mainly entertainment. However, their role can also be educational as many games incorporate historical elements into their script in order for the player to feel that he is inside of the world of the digital game.

In this study, in Chapter 1, there is an introduction to the subject of this study and a historical review of the technology of creating the first video games. Chapter 2 presents some successful games and some statistics. Chapter 3 describes the Blender 3D modeling software. Chapter 4 discusses the different stages of modeling design as well as common techniques used by modelers. In Chapter 5, another stage of the realization of a character for video games is described, which is the creation of materials-textures for the various parts that make it up, such as skin, hair, clothes, armor, etc. to achieve a realistic result. Chapter 6 presents the lighting and shading algorithms used by experts. Chapter 7 describes the creation of a skeleton and its motion application methods. In Chapter 8, the actions of creating a 3D model of Achilles from Homer's Iliad and the implementation of a small game on the Unity platform are presented in detail. To implement the character,

open source software such as Blender, Gimp, Photoshop, Instant Meshes, the Unity platform and the Mixamo.com web application were used. In this way, the cost of creating the character was zero since the use of these software does not require any financial support. Due to the attraction of the young audience to fighting games as well as the possibility of learning new historical figures, the hero of Homer's Iliad, Achilles, was chosen as the design character, with the aim of encouraging players to immerse themselves more in Greek mythology learning new information. Finally, in Chapter 9 the conclusions derived from this study are summarized and reference is made to the future extensions of this work.

Keywords:

Video game industry, game, video game designers, video game development, video game character, 3D design, algorithms, texture, material, Blender, Unity, Gimp, Achilles

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες</i>	<i>vii</i>
<i>Περίληψη</i>	<i>viii</i>
<i>Abstract</i>	<i>x</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων</i>	<i>13</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>16</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>22</i>
<i>Γενική Ορολογία</i>	<i>22</i>
<i>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</i>	<i>24</i>
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	25
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής	28
1.3 Οργάνωση του τόμου	29
<i>Κεφάλαιο 2 Εισαγωγή στα βιντεοπαιχνίδια</i>	<i>31</i>
2.1 Εισαγωγή.....	31
2.2 Στάδια δημιουργίας ανθρώπινου μοντέλου	34
2.2.1 Εισαγωγή	34
<i>Κεφάλαιο 3 Λογισμικό Blender</i>	<i>36</i>
3.1 Τι είναι το λογισμικό Blender	36
3.2 Δομή του Blender.....	36
3.2.1 Γενικό περιβάλλον-Layout	37
3.2.2 Περιβάλλον Εργασίας Μοντελισμού και Γλυπτικής	38
3.2.3 Περιβάλλον Εργασίας Χαρτογράφησης και Χρωματισμού των Υφών	39
3.2.4 Περιβάλλον Εργασίας Σκίασης και Δημιουργίας Υλικών.....	40
3.2.5 Περιβάλλον Εργασίας Κίνησης	41
3.3 Σε ποιους απευθύνεται	42
<i>Κεφάλαιο 4 Μοντελισμός και Γλυπτική</i>	<i>44</i>

4.1 Μοντελισμός	44
4.1.1 Box/Polygonal modeling	46
4.1.2 Nurbs and curve modeling	47
4.1.3 Digital 3D Sculpting	48
4.1.4 Photogrammetry	49
4.1.5 Simulation	50
4.1.6 Procedural modeling	50
4.1.7 Boolean modeling	51
4.1.8 Kit Bashing	52
4.2 Βασικοί αλγόριθμοι μοντελισμού	53
4.2.1 Μετατόπιση, Περιστροφή και Κλιμάκωση	53
4.2.2 Πρόσθεση σημείων	55
4.2.3 Ομαλοποίηση ενός πλέγματος	58
4.3 Γλυπτική	61
4.3.1 Είδη ψηφιακής γλυπτικής	62
4.4 Remesh	64
4.4.1 Πού εφαρμόζεται συνήθως	66
4.4.2 Τεχνικές/αλγόριθμοι remeshing	67
Κεφάλαιο 5 UV Texturing	71
5.1 UV Unwrapping	71
5.2 Αλγόριθμοι μετατροπής ενός 3D μοντέλου σε 2D	72
5.2.1 Least Squared Conformal Mapping -LCSM	72
5.2.2 Angle Based Flattening & ABF++	74
5.3 Normal Maps και Normal Baking	75
5.3.1 Normal Map	75
5.3.2 Normal Baking	76
5.4 Δημιουργία υφών – Texture Generation	77
5.4.1 Μέταλλο	78
5.4.2 Μάρμαρο	79
5.4.3 Ξύλο	80
5.5 Δημιουργία υφών μέσω τεχνητής νοημοσύνης	81
5.5.1 Δημιουργία υφών μέσω αυτόματης δημιουργίας κόμβων	81
Κεφάλαιο 6 Σκίαση και Φωτισμός	83

6.1 Ανάκλαση φωτισμού	84
6.1.1 Συνάρτηση Διανομής Αμφίδρομης Ανάκλασης	86
6.1.2 Συνάρτηση Κατανομής Κάθετων Διανυσμάτων - NDF	87
6.1.3 Συνάρτηση Fresnel – FF	93
Κεφάλαιο 7 Rigging και Animation.....	96
7.1 Rigging.....	96
7.1.1 Δημιουργία συστήματος σκελετού.....	96
7.1.2 Αυτόματη δημιουργία σκελετού	97
7.2 Animation.....	99
7.2.1 Interpolation	99
7.2.2 Αλγόριθμοι κίνησης	101
7.3 Μέθοδοι εφαρμογής κίνησης.....	105
7.3.1 Motion Capture.....	106
7.3.2 Παραμετρικό σύστημα κίνησης.....	107
7.3.3 Εξαγωγή κίνησης από βίντεο	108
Κεφάλαιο 8 Υλοποίηση Χαρακτήρα	110
8.1 Εισαγωγή.....	110
8.2 Εικόνες αναφοράς	110
8.3 Μοντελισμός	111
8.4 Γλυπτική	114
8.4.1 Remesh	116
8.5 Κίνηση	116
8.5.1 Rigging.....	116
8.5.2 Animation.....	117
8.6 Texturing	118
8.7 Unity	120
Κεφάλαιο 9 Σύνοψη και συμπεράσματα	124
9.1 Μελλοντικές επεκτάσεις	125
Βιβλιογραφία.....	127

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Χαρακτήρας από το παιχνίδι Mario χαμηλής ανάλυσης εικονοστοιχείων (αριστερά) και υψηλής (δεξιά) [2]	25
Εικόνα 2 Στιγμιότυπο παιχνιδιού Quake [81]	26
Εικόνα 3 God of War 5: Ragnarok [8].....	27
Εικόνα 4 Ο τζίρος της βιομηχανίας των βιντεοπαιχνιδιών για τα έτη 2017-2027 [10].	31
Εικόνα 5 Η Αλόη από το παιχνίδι Horizon Zero Dawn [82].....	33
Εικόνα 6 Γράφος σταδίων σχεδίασης και δημιουργίας μοντέλων [23].....	34
Εικόνα 7 Επεξήγηση του γραφικού περιβάλλοντος (πάνω). Καρτέλες επιλογής περιβάλλοντος εργασίας (κάτω) [24] [25]	37
Εικόνα 8 Περιβάλλον Εργασίας Μοντελισμού(αριστερά) και Περιβάλλον Εργασίας Ψηφιακής Γλυπτικής (δεξιά) μέσα από το λογισμικό Blender.	39
Εικόνα 9 Περιβάλλον Εργασίας Χαρτογράφησης Συντεταγμένων και Χρωματισμού μέσα από το λογισμικό Blender.	40
Εικόνα 10 Σύστημα δημιουργίας υφών με κόμβους (node based system) μέσα από το λογισμικό Blender	41
Εικόνα 11 Περιβάλλον Εργασίας Κίνησης μέσα από το λογισμικό Blender.....	42
Εικόνα 12 Δημογραφικά στοιχεία με βάση την ηλικία και το φύλο των χρηστών [29].	43
Εικόνα 13 Ενδιαφέρον των χρηστών σε λογισμικά 3d περιεχομένου [30].	43
Εικόνα 14 Επεξήγηση ορολογίας τρισδιάστατου αντικειμένου μέσω του λογισμικού Blender	45
Εικόνα 15 Εφαρμογή που μετατρέπει μια ζωγραφιά ανθρώπινου σώματος σε τρισδιάστατο αντικείμενο [31].....	46
Εικόνα 16 Στάδια της τεχνικής του Box Modeling [33]	47
Εικόνα 17 Σχεδίαση καμπυλών-curves (αριστερά) και γέμιση αυτών με επιφάνειες-surfaces (δεξιά) για τον σχεδιασμό ενός μοντέλου αυτοκινήτου [34]	48

Εικόνα 18 Αποτέλεσμα μοντέλου ψηφιακής γλυπτικής από τον καλλιτέχνη Meng Wang [35].....	48
Εικόνα 19 Μοντελοποίηση σπιτιού με την λήψη πολλαπλών φωτογραφιών [36].....	49
Εικόνα 20 Προσομοίωση ωκεανού με ελεγχόμενες παραμέτρους από τον χρήστη [37] ..	50
Εικόνα 21 Διαδικαστικός μοντελισμός σκάλας (αριστερά). Μέρος του συστήματος γράφου (δεξιά) [38].....	51
Εικόνα 22 Ενδεικτικές λειτουργίες της Boolean modeling, από το λογισμικό Blender.....	52
Εικόνα 23 Διάφορα μοντέλα εξαρτημάτων (αριστερά). Τελικά μοντέλα με τον κατάλληλο συνδυασμό των εξαρτημάτων (δεξιά) [39].....	53
Εικόνα 24 Πίνακας Translation/Μετατόπισης [40].....	53
Εικόνα 25 Εφαρμογή του πίνακα Μετατόπισης [40].....	54
Εικόνα 26 Εφαρμογή του πίνακα περιστροφής [41]	54
Εικόνα 27 Εφαρμογή του πίνακα κλιμάκωσης [42]	55
Εικόνα 28 Παραδείγματα των λειτουργιών Move, Rotate, Scale στο λογισμικό Blender.	55
Εικόνα 29 Αναδρομική υποδιαίρεση μιας επιφάνειας.(α) Πλέγμα βασικού επιπέδου. (b)Μετά από 1 επίπεδο υποδιαίρεσης. (c) Μετά από 2 επίπεδα υποδιαίρεσης.(d) Οριακή επιφάνεια (υποδιαίρεση άπειρων επιπέδων). [44].....	56
Εικόνα 30 Αριστερά έχουμε έναν απλό κύβο, και δεξιά εφαρμόζουμε διαδοχικά βήματα 1,2,3 του αλγορίθμου Catmull-Clark στο λογισμικό Blender.....	57
Εικόνα 31 Εργαλείο Knife (αριστερά). Subdivide Edge (δεξιά) στο λογισμικό Blender.	58
Εικόνα 32 Τριγωνικό και Τετραγωνικό πλέγμα [47].	58
Εικόνα 33 «Τέντωμα» των κορυφών ενός τριγώνου [46].....	59
Εικόνα 34 Λειτουργία συρρίκνωσης [46].	60
Εικόνα 35 Αρχικό πλέγμα δίχως καμία ομαλοποίηση (αριστερά). Τελικό ομαλό πλέγμα (δεξιά) [46].....	61
Εικόνα 36. α)Κινήσεις χρήστη, β) προτάσεις λογισμικού με βάση τις κινήσεις, γ) αποδοχή όλων των προτάσεων [49]	64
Εικόνα 37 Ροή πολυγώνων μέσω του λογισμικού Blender.	65
Εικόνα 38 Sculpted μοντέλο από το παιχνίδι Assassin's Creed III μέσω του λογισμικού Blender.	66
Εικόνα 39 Remeshed μοντέλο από το παιχνίδι Assassin's Creed III μέσω του λογισμικού Blender..	67

Εικόνα 40 Αρχικό μοντέλο υψηλού αριθμού κορυφών και ακμών μέσω του λογισμικού Blender.	67
Εικόνα 41 Κυλινδρική επιφάνεια με καλή ροή γεωμετρίας (αριστερά) και κακή (δεξιά) μέσω του λογισμικού Blender.....	68
Εικόνα 42 Επίπεδη επιφάνεια με καλή ροή γεωμετρίας (αριστερά) και κακή (δεξιά) μέσω του λογισμικού Blender.	68
Εικόνα 43 Παράδειγμα αποτελέσματος αλγορίθμου QuadRemesh [51].....	69
Εικόνα 44 Κατάρρευση κορυφής u με τη μέθοδο Edge Collapse [52].....	70
Εικόνα 45 Τεχνική UV Unwrapping τρισδιάστατου αντικειμένου και εφαρμογή εικόνας πάνω στο αρχικό 3d αντικείμενο μέσω του λογισμικού Blender.....	71
Εικόνα 46 Τμηματοποίηση τρισδιάστατου μοντέλου (αριστερή). Least squared conformal mapping σε δυσδιάστατη μορφή εικόνας (μεσαία). Εφαρμογή mapping της μεσαίας εικόνας στο τρισδιάστατο μοντέλο (δεξιά) [53].	73
Εικόνα 47 Στατιστικά για τον αριθμό των κορυφών, όψεων και χρόνοι εκτέλεσης (κάθετα) σε σχέση με 4 γνωστά μοντέλα benchmarking (οριζόντια) [53].	73
Εικόνα 48 Χρόνος εκτέλεσης του LSCM σε σχέση με τον αριθμό των κορυφών μέσω του λογισμικού Blender.	74
Εικόνα 49 Εικόνα Normal map με κωδικοποιημένες τρύπες σαν χρώματα rgb (αριστερά). Εφαρμοσμένο normal map σε επίπεδο με φωτισμό (δεξιά) μέσω του λογισμικού Blender.	76
Εικόνα 50 Παράδειγμα εφαρμογής normal map texture από μοντέλο HP σε LP [55].....	77
Εικόνα 51 Σχεδίαση μεταλλικού υλικού με τη βοήθεια υφών με γρατζουνιές και ατέλειες για περισσότερη ρεαλιστικότητα (α , β), και του συστήματος κόμβων (γ) μέσω του λογισμικού Blender.	78
Εικόνα 52 Διαφοροποιήσεις μεταλλικού υλικού με αλλαγή παραμέτρων στο σύστημα κόμβων μέσω του λογισμικού Blender.	78
Εικόνα 53 Υφή ξύλου σε σφαίρα (α) και Σύστημα κόμβων για τη δημιουργία υφής ξύλου (β) μέσω του λογισμικού Blender.	80
Εικόνα 54 Μετατροπή υφής (material) ξύλου σε δισδιάστατη εικόνα υφής (texture) μέσω της λειτουργίας Bake του Blender.	80
Εικόνα 55 Είσοδος εικόνων στο σύστημα CNN και μετατροπή τους σε παραμετροποιήσιμες (αριστερά). Εφαρμογή νέων εικόνων με τη μορφή υφών σε	

μοντέλο σπιτιού (μεσαία) και παραλλαγή αυτών μέσω της επεξεργασία των παραμέτρων του συστήματος γράφου που παράχθηκε (δεξιά) [56].	81
Εικόνα 56 Αποτέλεσμα των παραπάνω τεχνικών ως είσοδος στο ασθενοφόρο [56].	82
Εικόνα 57 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, με το ορατό τμήμα να επισημαίνεται [57]	83
Εικόνα 58 Τέλειος κατοπτρικός ανακλαστήρας [59]	84
Εικόνα 59 Οι μικροόψεις μιας φαινομενικά λείας επιφάνειας που στην πραγματικότητα είναι ελάχιστα τραχιά [61]	85
Εικόνα 60 Διερεύνηση ανάκλασης του φωτός σε σχέση με την τραχύτητα της σφαίρας μέσω του λογισμικού Blender.	86
Εικόνα 61 Το φως είναι άσπρο, τα χρώματα Diffuse (χρώμα αντικειμένου), Ambient (γενικό φως στον χώρο που προκύπτει από όλα τα αντικείμενα του χώρου) είναι μπλε. Το Specular χρώμα είναι άσπρο [64].	88
Εικόνα 62 Blinn-Phong σκίαση με βάση την τιμή Smoothness (ομαλότητα της επιφάνειας) [61].	89
Εικόνα 63 Σκίαση μέσω της συνάρτησης του Beckmann βάσει της τραχύτητας του μοντέλου σφαίρας [61].	90
Εικόνα 64 Σκίαση μέσω του αλγορίθμου των Walter, Torrance [61].	90
Εικόνα 65 Ανισοτροπική ιδιότητα σε μεταλλική κατσαρόλα (αριστερά) μέσα από το λογισμικό Blender, μαλλιά (μεσαία εικόνα) [65]. Σκίαση μέσω Trowbridge-Reitz Anisotropic [61].	91
Εικόνα 66 Αυτοσκίαση μέσω της συνάρτησης Implicit GSF [61].	92
Εικόνα 67 Σκίαση μέσω Cook-Torrance GSF [61].	92
Εικόνα 68 Βαθμός ανάκλασης βάση της γωνίας θέασης [66].	93
Εικόνα 69 Εφέ ανάκλασης Fresnel βάση τη γωνία θέασης [66].	94
Εικόνα 70 Φαινόμενο Fresnel σε μια σφαίρα στο λογισμικό Blender.	94
Εικόνα 71 Ιεραρχία Σκελετού με σχέση πατέρα-παιδιού [84].	96
Εικόνα 72 Vertex Weights για το οστό που μετασχηματίζει το κεφάλι μέσω του λογισμικού Blender.	97
Εικόνα 73 Αυτόματο Rigging (σκελετοποίηση) ανθρώπινου χαρακτήρα με το πρόγραμμα Pinocchio [68].	98
Εικόνα 74 Αυτόματη Τμηματοποίηση (Segmentation) και Σκελετοποίηση (Rigging) σε ανθρώπινα και μη μοντέλα [69].	99

Εικόνα 75 Σημεία γραμμικής παρεμβολής (α), συνεχόμενη γραμμή μέσω των σημείων γραμμικής παρεμβολής (β) στο λογισμικό Matlab.	100
Εικόνα 76 Σημεία γραμμικής παρεμβολής (α), συνεχόμενη γραμμή μέσω των σημείων spline παρεμβολής (β) στο λογισμικό Matlab.	101
Εικόνα 77 Στιγμιότυπο επανάληψης Forward σε αλυσίδα οστών μέσω του λογισμικού draw.io.	103
Εικόνα 78 Στιγμιότυπο επανάληψης Backward αμέσως μετά από την εφαρμογή της Forward στην ίδια αλυσίδα μέσω του λογισμικού draw.io.	103
Εικόνα 79 Χρήση του βοηθητικού οστού PoleTarget για την ελεγχόμενη περιστροφή των οστών μέσω της πλατφόρμας Unity.	104
Εικόνα 80 Διαδικασία σύγκλισης με τη μέθοδο CCD [72].	105
Εικόνα 81 Οι αξιοσημείωτοι ηθοποιοί, Laura Bailey και Richard McGonagle, στα γυρίσματα του Uncharted 4: A Thief's End [74].	107
Εικόνα 82 Σκελετός αλόγου (α) και ολισθητές Διεπαφής Χρήστη για την κίνηση του αριστερού ποδιού (β) [75].	108
Εικόνα 83 Εξαγωγή κίνησης από βίντεο μέσω της υπηρεσίας Animate3D της εταιρείας DeepMotion.	109
Εικόνα 84 Μετατροπή των καρτέ του βίντεο σε πόζες ενός τρισδιάστατου μοντέλου του χρήστη μέσω της Deep Motion – Animate3d.	109
Εικόνα 85 Εικόνες αναφοράς για την ανατομία του σώματος [76] [77] [78].	110
Εικόνα 86 Διαδοχικά face extrudes για τη δημιουργία ποδιού μέσω του λογισμικού Blender.	111
Εικόνα 87 Μοντελοποίηση ποδιών μέσω του λογισμικού Blender.	111
Εικόνα 88 Μοντελοποίηση του θώρακα μέσω του λογισμικού Blender.	112
Εικόνα 89 Μοντελοποίηση περιβραχιονίου μέσω του λογισμικού Blender.	112
Εικόνα 90 Μοντελοποίηση της ασπίδας μέσω του λογισμικού Blender.	112
Εικόνα 91 Μοντελοποίηση δόρατος μέσω του λογισμικού Blender.	113
Εικόνα 92 Μοντελοποίηση περικνημίδας μέσω του λογισμικού Blender.	113
Εικόνα 93 Μοντελοποίηση περικεφαλαίας μέσω του λογισμικού Blender.	114
Εικόνα 94 Δημιουργία βασικού σχήματος σώματος μέσω απλών σφαιρών μέσω του λογισμικού Blender.	114

Εικόνα 95 Εισαγωγή λεπτομερειών στο άνω σώμα για ρεαλιστικούς μύες μέσω του λογισμικού Blender.	114
Εικόνα 96 Σχεδιασμός πατούσας μέσω του λογισμικού Blender.....	115
Εικόνα 97 Σχεδιασμός παλάμης χεριού μέσω του λογισμικού Blender.....	115
Εικόνα 98 Σχεδιασμός ποδιών μέσω του λογισμικού Blender.	115
Εικόνα 99 Σχεδιασμός κεφαλιού και προσώπου μέσω του λογισμικού Blender.....	116
Εικόνα 100 Μεταφορά λεπτομερειών μέσω Remeshing με το πρόγραμμα Instant Meshes (α) και με εργαλεία του Blender (β).	116
Εικόνα 101 Διαδικασία Rigging μέσω του προγράμματος της Mixamo.....	117
Εικόνα 102 Σύνολο κινήσεων που δύναται να εκτελέσει ο χαρακτήρας μας με το λογισμικό Blender.	118
Εικόνα 103 UV Seams του σώματος που απεικονίζονται με κόκκινες γραμμές (α), UV χαρτογράφηση των κορυφών (β) μέσα στο λογισμικό Blender.	118
Εικόνα 104 Μεταφοράς λεπτομέρειας από το μοντέλο μεγάλου αριθμού πολυγώνων (α) στο χαμηλού αριθμού (β) μέσω Normal Map Bake (γ) για την περικεφαλαία μέσω του λογισμικού Blender	119
Εικόνα 105 Μεταφοράς λεπτομέρειας από το μοντέλο μεγάλου αριθμού πολυγώνων (α) στο χαμηλού αριθμού (β) μέσω Normal Map Bake (γ) για την πανοπλία μέσω του λογισμικού Blender.	119
Εικόνα 106 Δημιουργία υφής και χρωμάτων δέρματος μέσω Texture Painting μέσω Blender.	120
Εικόνα 107 Τελικό αποτέλεσμα της δημιουργίας του χαρακτήρα του Αχιλλέα χωρίς δόρυ και ασπίδα (αριστερά), με δόρυ και ασπίδα (δεξιά) στην πλατφόρμα Unity.....	120
Εικόνα 108 Πολεμική κίνηση Αχιλλέα στην πλατφόρμα Unity.....	121
Εικόνα 109 Αρπαγή του ακοντίου με τη χρήση του αλγορίθμου FABRIK Inverse Kinematics στην πλατφόρμα Unity.....	121
Εικόνα 110 Διεπαφή χρήστη με οδηγίες πλήκτρων-λειτουργιών στην πλατφόρμα Unity.	122
Εικόνα 111 Τελική μορφή παιχνιδιού στην πλατφόρμα Unity.....	123

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Στιγμιότυπα παιχνιδιών Stygian Abyss (αριστερά) [4] και Wolfenstein 3D (δεξιά) [5].....	26
Πίνακας 2 Λίστα AAA παιχνιδιών με συνολικά κέρδη για το 2018 [11] [12] [13] [14].....	32
Πίνακας 3 Λίστα μη AAA παιχνιδιών με συνολικά κέρδη μεγαλύτερα από τα AAA μέχρι το 2023 [15] [16] [17] [18] [19]	32
Πίνακας 4 Δημιουργία μαρμάρινου υλικού με σύστημα κόμβων και εναλλαγή χρώματος μέσω του λογισμικού Blender.....	79

Γενική Ορολογία

Vertex (πληθυντικός vertices)

Vertex ονομάζουμε το σημείο όπου δύο ή περισσότερες γραμμές/άκρα συναντώνται.

Edge

Edge ονομάζεται η γραμμή/ακμή που ενώνει δύο vertices.

Polygon/face

Polygon ή face ονομάζουμε την επίπεδη επιφάνεια που δημιουργούν τρία ή περισσότερα σημεία με τις ακμές που τις συνδέουν.

Texture coordinate

Συντεταγμένη στον δισδιάστατο χώρο (x, y) από 0.0 μέχρι 1.0 που χρησιμοποιείται στις υφές των πολυγώνων.

Pole

Πόλος ονομάζεται το σημείο όπου ενώνονται πάνω από δύο ακμές.

Edge flow

Ονομάζεται ο τρόπος που οι ακμές είναι τοποθετημένες μεταξύ τους. Καλή ροή είναι όταν είναι παράλληλες και κάθετες σχηματίζοντας παραλληλόγραμμα που προσεγγίζουν, όσο το δυνατόν, τα τετράγωνα.

Face normal

Κάθετο διάνυσμα σε επιφάνεια που ορίζεται από το εξωτερικό γινόμενο δύο ακμών που ανήκουν στη συγκεκριμένη επιφάνεια.

Face set

Ένα σύνολο πλευρών αποθηκευμένο σε μια λίστα.

Origin of the coordinate system

Αποτελεί το σημείο του συστήματος συντεταγμένων όπου οι άξονες του τέμνονται.

Remesh

Επαναπροσδιορισμός του πλέγματος ενός τρισδιάστατου μοντέλου.

Σκελετοποίηση

Εισαγωγή σκελετού σε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο.

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής μου εργασίας και προσπαθεί να εξερευνήσει τις ποικίλες δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές βιντεοπαιχνιδιών σε κάθε στάδιο της υλοποίησής τους μέχρι την κυκλοφορία τους προς αγορά από το ευρύ κοινό.

Για τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου χαρακτήρα βιντεοπαιχνιδιού, η γενική διαδικασία ξεκινάει από ένα προσχέδιο σε χαρτί ή σε λογισμικό από τον καλλιτέχνη προσχεδίων (concept artist). Ειδικοί στον χώρο μετατροπής από ένα προσχέδιο δύο διαστάσεων σε τρεις αναλαμβάνουν να φέρουν εις πέρας την εργασία τους χρησιμοποιώντας πλήθος εργαλείων και τεχνικών (3D modelers, digital sculptors κ.α.). Το προϊόν που προκύπτει από τους προαναφερθέντες καταλήγει σε καλλιτέχνες προσθήκης υφών, χρωμάτων και ρεαλιστικού φωτισμού και με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων ο χαρακτήρας γίνεται πιο ρεαλιστικός (texture artists, lighting artists κ.α.). Τα αντικείμενα (μοντέλα) που κινούνται στον χώρο αναλαμβάνουν οι ειδικοί της τοποθέτησης κίνησης με πλήθος από νέες τεχνικές και μεθοδολογίες (traditional animators, procedural animators κ.α.).

Συμπερασματικά, πλήθος από καλλιτέχνες (artists), όπως concept artists, animators, digital sculptors, digital costume designers, 3D modelers, lighting artists, texture painters, material designers αλλά και τεχνικοί επιστήμονες με γνώσεις φυσικής και μαθηματικών (που ερευνούν και δημιουργούν νέες τεχνικές και εργαλεία για να βοηθήσουν το έργο των προαναφερθέντων καλλιτεχνών), χρειάζεται να συνεργαστούν για να αναπτυχθεί, να παραχθεί και να τελειοποιηθεί το τελικό προϊόν ψυχαγωγίας που θα απολαύσουν οι χρήστες στις οθόνες τους. Κατά συνέπεια, το πλήθος των επαγγελματιών αυτών που χρειάζεται να συνεργαστεί αποδοτικά για την υλοποίηση ενός βιντεοπαιχνιδιού δημιουργεί μια πολυπλοκότητα στην επιτυχή δημιουργία του βιντεοπαιχνιδιού. Πολλές φορές ο διαθέσιμος χρόνος, ο οικονομικός προϋπολογισμός, η επικοινωνία και η συνεργασία μεταξύ των παραπάνω επαγγελματιών είναι το κλειδί για την επιτυχή (ή και μη επιτυχή), γρήγορη (ή χρονοβόρα) και όσο το δυνατόν λιγότερο (ή περισσότερο) κοστοβόρα δημιουργία του παιχνιδιού με στόχο τη μέγιστη αύξηση των κερδών από την πώλησή του. Έτσι, οι προαναφερθέντες επαγγελματίες της βιομηχανίας βιντεοπαιχνιδιών αναζητούν διαρκώς και διακαώς λογισμικά, εργαλεία, αλγορίθμους και τεχνικές που έχουν

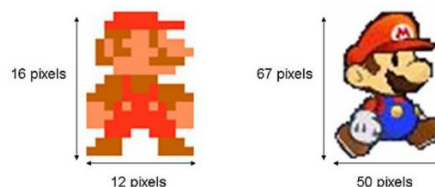
σημαντικό αντίκτυπο στη βελτίωση της ροής της εργασίας τους σε κάθε στοιχείο που υπάρχει στο παιχνίδι (Game Development Pipeline).

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Τα πρώτα βιντεοπαιχνίδια που είχαν σαν πρωταγωνιστή έναν χαρακτήρα πραγματοποίησαν την εμφάνισή τους κατά την δεκαετία του '90, με το δημοφιλές παιχνίδι Pacman, το 1980, και Mario, το 1981 [1]. Τα γραφικά τους αποτελούνταν από απλές δισδιάστατες σειρές εικόνων δίνοντας στον παίκτη την αίσθηση πως κινούνται με τη γρήγορη εναλλαγή τους ανά δευτερόλεπτο.

Τα βιντεοπαιχνίδια αυτά γνώρισαν τεράστια αποδοχή από το ευρύ νεανικό κοινό και οι εταιρίες δημιουργίας τους είδαν μεγάλη οικονομική επιτυχία, με έσοδα που ξεπερνάνε τα 1,5 δις δολάρια. Παράλληλα, οι χαρακτήρες των παιχνιδιών έγιναν οι πιο αναγνωρίσιμοι χαρακτήρες όλων των εποχών από τους παίκτες και το ευρύ κοινό. Στην εποχή εκείνη δεν χρειάζονταν φανταχτερά γραφικά για να πεισθεί ένας άνθρωπος να δοκιμάσει να παίξει ένα παιχνίδι, λόγω του ότι αυτού του είδους η ψυχαγωγία ήταν εντελώς καινούργια και εξωπραγματική.

Λόγω της ανίσχυρης, για τα σημερινά δεδομένα, υπολογιστικής δύναμης, οι χαρακτήρες αποτελούνταν από μερικές δεκάδες από εικονοστοιχεία (pixels) χωρίς ωστόσο να στερούν από τους παίκτες την αίσθηση αδρεναλίνης όταν κάποιο εχθρικό στοιχείο κυνηγά τον χαρακτήρα με τον οποίο παίζουν και ταυτίζονται. Για παράδειγμα, ο χαρακτήρας Mario αποτελούνταν από 16 εικονοστοιχεία (pixels) σε ύψος και 12 εικονοστοιχεία σε πλάτος. Είναι λογικό κάποιος να παρατηρήσει πως όσα περισσότερα pixels καταλαμβάνουν χώρο στο ίδιο μέγεθος μιας οθόνης, τόσο πιο ελκυστικός γίνεται στο μάτι του παίκτη ο χαρακτήρας διότι οπτικά, η λεπτομέρεια κάνει την διαφορά, όπως βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα [2].



Εικόνα 1 Χαρακτήρας από το παιχνίδι Mario χαμηλής ανάλυσης εικονοστοιχείων (αριστερά) και υψηλής (δεξιά) [2]

Με την πάροδο του χρόνου δημιουργήθηκε ισχυρός ανταγωνισμός από τις εταιρείες κατασκευής βιντεοπαιχνιδιών ανεβάζοντας τον πήχη. Οι σχεδιαστές τους αφιέρωναν τον περισσότερο χρόνο τους στην ιδέα ενός χαρακτήρα καθώς και ποια χαρακτηριστικά θα τον αναδείκνυαν στο ευρύ κοινό των παικτών και όχι στην υλοποίηση αφού τα συνολικά εικονοστοιχεία είναι ελάχιστα. Η εξέλιξη της τεχνολογίας καθώς και οι προηγμένοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον τομέα των γραφικών οδήγησαν σε υψηλότερη ανάλυση χρωμάτων και ρεαλιστικότερα περιβάλλοντα, υποχρεώνοντας έτσι τους σχεδιαστές βιντεοπαιχνιδιών να αφιερώνουν περισσότερο χρόνο στα γραφικά τους. Παιχνίδια όπως το Ultima Underworld: The Stygian Abyss και το Wolfenstein 3D, τα οποία βγήκαν στην αγορά το έτος 1992, πρωτοπόρησαν στα γραφικά τριών ψευδο-διαστάσεων που χρησιμοποιούνταν κυρίως στους τοίχους. Η τεχνική τους αποτελούνταν από απλές υφές δύο διαστάσεων, κλιμακούμενες ανάλογα με την απόσταση της κάμερας του παίκτη και του αντικειμένου με τις υφές αυτές, δίνοντας έτσι την αίσθηση του τρισδιάστατου φαινομένου κάνοντας τον παίκτη να νομίζει πως βρίσκεται σε τρισδιάστατο χώρο [3].

Πίνακας 1 Στιγμιότυπα παιχνιδιών Stygian Abyss (αριστερά) [4] και Wolfenstein 3D (δεξιά) [5]



Εικόνα 2 Στιγμιότυπο παιχνιδιού Quake [81]

Ορόσημο στα ολοκληρωμένα τοπία και στους χαρακτήρες τριών διαστάσεων έγινε το παιχνίδι Quake, δημοσιευμένο το 1996, αφού ήταν το πρώτο παιχνίδι δράσης που υλοποίησε ολοκληρωμένο τρισδιάστατο περιβάλλον δίνοντας τη δυνατότητα στον παίκτη να περιστρέψει

την κάμερά του με εύρος 360 μοιρών, χαρακτηριστικό που έλειπε από παλαιότερα παιχνίδια [6].

Έτσι οι μοντελιστές και σχεδιαστές βιντεοπαιχνιδιών έπρεπε να εγκαταλείψουν τη δισδιάστατη σχεδίαση αντικειμένων και να επικεντρωθούν σε τρισδιάστατες τεχνικές μοντελοποίησης και αλγορίθμους, καθιστώντας εφικτή την θέαση αυτών από όλες τις πιθανές θέσεις και γωνίες της κάμερας.

Τα προηγούμενα χρόνια, η σχεδίαση των χαρακτήρων των βιντεοπαιχνιδιών ήταν απλή καθώς ένας χαρακτήρας αποτελούταν από λίγα εικονοστοιχεία. Για να επιτευχθεί η αίσθηση της κίνησης του χαρακτήρα χρειαζόταν γρήγορη εναλλαγή των καρέ απεικόνισης του χαρακτήρα με διαφορετική στάση σώματος ανά στιγμή. Σε αντίθεση, στα σημερινά παιχνίδια τρισδιάστατων γραφικών οι χαρακτήρες είναι πιο περίπλοκοι και έχουν την ανάγκη να αποτυπωθούν σε σημεία χώρου τριών διαστάσεων (3D), με ακμές που ενώνουν τα σημεία και πλευρές που συντίθενται ανά τρεις ακμές για ένα καθηλωτικό αποτέλεσμα [7]. Εξαιρετικό παράδειγμα ρεαλιστικών γραφικών υψηλής ανάλυσης είναι το παιχνίδι God Of War 5: Ragnarok το οποίο δημοσιεύτηκε στο έτος 2022 από την Sony Interactive Entertainment [8].



Εικόνα 3 God of War 5: Ragnarok [8].

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει τον τομέα της κατασκευής τρισδιάστατων γραφικών για βιντεοπαιχνίδια μέσω της δημιουργίας χαρακτήρων ρεαλιστικής όψης και την κατανόηση όλων των απαραίτητων σταδίων από την αρχή μέχρι το τέλος ούτως ώστε να τελειοποιηθεί το μοντέλο προς εξαγωγή σε μια μηχανή βιντεοπαιχνιδιών.

Τα στάδια της υλοποίησης ενός τρισδιάστατου χαρακτήρα είναι τα εξής: concept design, modeling, sculpting, unwrapping, texturing, rigging, animation και είναι ξεχωριστά μεταξύ τους αλλά είναι αλληλένδετα και περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

Τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι επαγγελματίες στον χώρο της βιομηχανίας παιχνιδιών είναι κυρίως έλλειψης σε βάθος γνώσεων εφαρμογής προγραμμάτων και εργαλείων, καθώς και γρήγορης και ευέλικτης διεκπεραίωσης της εργασίας τους. Τα εν λόγω προβλήματα έχουν συνήθως αλυσιδωτές συνέπειες στα στάδια υλοποίησης ενός βιντεοπαιχνιδιού καθώς το ένα στάδιο έχει συνήθως άμεση εξάρτηση από το προηγούμενο. Για παράδειγμα, εάν κάποιος επαγγελματίας χρειαστεί περισσότερο χρόνο για να υλοποιήσει την εργασία του, αυτό θα έχει ως συνέπεια την καθυστέρηση του έργου των άλλων επαγγελματιών που τα έργα τους είναι αλληλένδετα με αυτό. Αυτές οι καθυστερήσεις θα έχουν ως γενικότερη συνέπεια την αύξηση του οικονομικού προϋπολογισμού για το συγκεκριμένο project και τη γενικότερη καθυστέρηση της δημοσίευσης του παιχνιδιού, άρα και την καθυστέρηση εσόδων της εταιρείας καθώς αυτό δεν είχε υπολογιστεί στο αρχικό πλάνο της εταιρείας. Επίσης, κάθε χαρακτήρας ενός παιχνιδιού είναι ξεχωριστός καθώς έχει αρκετά χαρακτηριστικά που τον καθιστούν μοναδικό σε σχέση με άλλους χαρακτήρες. Έτσι, ένας επαγγελματίας σχεδιαστής κινήσεων, για να μην καθυστερήσει το έργο του, πρέπει να καταστρώσει όσο το δυνατόν περισσότερο παραμετροποιήσιμο και γενικό ένα σύστημα κίνησης ενός σκελετού με στόχο να μπορεί να το επαναχρησιμοποιήσει και για άλλους χαρακτήρες που θα δημιουργήσει οι οποίοι μπορεί να έχουν ίδιο ή και διαφορετικό αριθμό ποδιών, χεριών κ.λπ. Για τον ειδικό στην χαρτογράφηση (unwrapping) 3D σημείων σε 2D είναι απαραίτητο να έχει γνώσεις εφαρμογής αλγορίθμων και προγραμμάτων που ελαχιστοποιούν τον χρόνο ενασχόλησής του και παράγουν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Σε περίπτωση

αδυναμίας μιας τεχνικής να παράξει τα επιθυμητά αποτελέσματα, ο ειδικός πρέπει να είναι σε θέση να εφαρμόσει εναλλακτική τεχνική.

Στην παρούσα εργασία αναζητήθηκαν και παρουσιάζονται αλγόριθμοι, μέθοδοι και τεχνικές για κάθε στάδιο δημιουργίας ενός χαρακτήρα. Παλαιότερες μέθοδοι και τεχνικές από επιστημονικά περιοδικά και βιβλία καταγράφονται καθώς αναδεικνύονται και νέοι αλγόριθμοι που λύνουν ή ελαχιστοποιούν τα προαναφερθέντα προβλήματα.

Συγκεκριμένα, σε κάθε στάδιο υλοποίησης, έχει μελετηθεί η αντίστοιχη βιβλιογραφία με σκοπό τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τεχνικές και μεθόδους που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κατασκευής βιντεοπαιχνιδιών. Πολλές από αυτές έχουν καταγραφεί δίνοντας στον αναγνώστη τα απαραίτητα εφόδια και τις γνώσεις για να εντρυφήσει περισσότερο στο στάδιο υλοποίησης που του ταιριάζει και τον ενδιαφέρει.

1.3 Οργάνωση του τόμου

Η παρούσα εργασία αποτελείται συνολικά από 9 κεφάλαια διαρθρωμένα ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγή στο θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιγράφοντας κάποια στοιχεία του κλάδου των βιντεοπαιχνιδιών. Έπειτα, γίνεται μια ιστορική αναδρομή στην τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των πρώτων βιντεοπαιχνιδιών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αντικείμενο αυτής της μελέτης φτάνοντας έτσι στο παρόν σημείο όπου αναφέρεται επιγραμματικά η οργάνωση του τόμου.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στα βιντεοπαιχνίδια και παρουσιάζονται προηγούμενα παραδείγματα επιτυχημένων παιχνιδιών όπως και κάποια ενδιαφέροντα στατιστικά στοιχεία για αυτά.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια γενική εισαγωγή για το λογισμικό μοντελισμού Blender που είναι κατάλληλο για εύκολη σχεδίαση και υλοποίηση πολύπλοκων ρεαλιστικών 3D μοντέλων.

Στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται λεπτομερώς τα διαφορετικά στάδια σχεδιασμού.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται τα διαφορετικά στάδια σχεδίασης μοντελισμού τα οποία, σε επαγγελματικές εργασίες, αναλαμβάνει να διεκπεραιώσει ο εκάστοτε υπεύθυνος του τομέα αυτού που είναι ειδικός και ασχολείται εξ ολοκλήρου με αυτό το κομμάτι.

Αναφέρονται αλγόριθμοι και κοινές τεχνικές που χρησιμοποιούνται επιτυχώς καθημερινά από τους μοντελιστές.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται ένα άλλο στάδιο της υλοποίησης ενός χαρακτήρα για βιντεοπαιχνίδια που είναι η δημιουργία υλικών-υφών για τα διάφορα μέρη που τον αποτελούν όπως δέρμα, μαλλιά, ρούχα, πανοπλία κ.α. καθώς και η εύκολη εφαρμογή τους. Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιούνται συστήματα μαθηματικών συναρτήσεων, εικόνες και εμπειρική γνώση για την καλύτερη δυνατή επίτευξη πιο ρεαλιστικού αποτελέσματος.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η σημασία του φωτισμού για τη δημιουργία ενός χαρακτήρα και παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι φωτισμού και σκίασης των υλικών που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων.

Στο Κεφάλαιο 7 περιγράφεται η δημιουργία ενός συστήματος σκελετού. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην τεχνική του animation και στα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για να δοθεί η αίσθηση της κίνησης στον σκελετό. Έπειτα, περιγράφονται οι μέθοδοι εφαρμογής της κίνησης που χρησιμοποιούν οι επαγγελματίες.

Στο Κεφάλαιο 8 περιγράφονται αναλυτικά οι ενέργειες δημιουργίας ενός τρισδιάστατου μοντέλου του Αχιλλέα της Ομήρου Ιλιάδας και η υλοποίηση ενός μικρού παιχνιδιού (demo) στην πλατφόρμα της Unity, όπου αναδεικνύονται οι δυνατότητες και οι κινήσεις του χαρακτήρα στον χώρο.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα μελέτη και γίνεται αναφορά στις μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2 Εισαγωγή στα βιντεοπαιχνίδια

2.1 Εισαγωγή

Ως **αλγόριθμος** ορίζεται μια πεπερασμένη σειρά ενεργειών, αυστηρά καθορισμένων και εκτελέσιμων σε πεπερασμένο χρόνο, που στοχεύουν στην επίλυση ενός προβλήματος. Είναι δηλαδή μια σειρά από εντολές που έχουν αρχή και τέλος, είναι σαφείς και έχουν ως σκοπό την επίλυση κάποιου προβλήματος [9].

Ο κλάδος της βιομηχανίας των βιντεοπαιχνιδιών είχε σύνολο πωλήσεων 249.6 δισεκατομμύρια το έτος 2023 και αναμένεται να ξεπεράσει τα 363 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2027 [10].



Εικόνα 4 Ο τζίρος της βιομηχανίας των βιντεοπαιχνιδιών για τα έτη 2017-2027 [10].

Τα παιχνίδια πρώτης κλάσης ή Triple-A (AAA Games) είναι βιντεοπαιχνίδια που παράγονται ή αναπτύσσονται από μεγάλους εκδότες, με τεράστιο προϋπολογισμό τόσο για ανάπτυξη όσο και για τη διαφήμιση μέσω του μάρκετινγκ. Ο όρος, που αρχικά αναφέρθηκε στη δεκαετία του 90, δεν αντιστοιχεί σε επίσημη ταξινόμηση, αλλά γενικά, ένα «παιχνίδι Triple-A» είναι ισοδύναμο με τον όρο «blockbuster» για τις ταινίες.

Μερικά από τα πιο επιτυχημένα AAA βιντεοπαιχνίδια με βάση τα συνολικά κέρδη του έτους 2018 είναι στην παρακάτω λίστα.

Πίνακας 2 Λίστα AAA παιχνιδιών με συνολικά κέρδη μέχρι το 2023 [11] [12][13][14]

Grand Theft Auto V	\$8.6 δισεκατομμύρια
Red Dead Redemption 2	\$3.3 δισεκατομμύρια
Tom Clancy's Rainbow Six Siege	\$1 δισεκατομμύρια
Monster Hunter: World	\$402 εκατομμύρια

Υπάρχουν περισσότερα παιχνίδια που κέρδισαν περισσότερα από αυτά του παραπάνω πίνακα, αλλά δεν θεωρούνται παιχνίδια AAA, κυρίως επειδή ο εκδότης δεν είχε μεγάλο προϋπολογισμό. Μερικά από τα παιχνίδια αυτά είναι τα εξής.

Πίνακας 3 Λίστα μη AAA παιχνιδιών με συνολικά κέρδη μεγαλύτερα από τα AAA μέχρι το 2023 [15][16][17][18][19]

Dungeon Fighter Online	\$22 δισεκατομμύρια
Fortnite	\$13 δισεκατομμύρια
League of Legends	\$14 δισεκατομμύρια
PlayerUnknown's Battlegrounds	\$13 δισεκατομμύρια
Pokemon Go	\$8 δισεκατομμύρια

Η κατασκευή ενός ρεαλιστικού χαρακτήρα με την ολοκλήρωση κάθε σταδίου είναι μια αρκετά απαιτητική και χρονοβόρα διαδικασία. Για τον λόγο αυτό, ανεξάρτητοι ερευνητές, εταιρείες κατασκευής λογισμικού και παιχνιδιών, μαθηματικοί, φυσικοί και άλλοι επιστήμονες έχουν αφιερώσει τεράστια ποσά χρήματος και χρόνου αντίστοιχα για τη διευκόλυνση και την εξέλιξη αυτού του επαγγέλματος. Πληθώρα συγγραμμάτων και επιστημονικών άρθρων έχουν δημοσιευθεί έτσι ώστε να διοχετευτεί η γνώση, οι τεχνικές και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη του καλύτερου αποτελέσματος σχετικά με τα βιντεοπαιχνίδια. Μελέτες στους τομείς των μέσων μαζικής ενημέρωσης, της μυθοπλασίας και των τεχνών, υποδηλώνουν ότι όσο πιο πολύ αντιλαμβάνονται οι άνθρωποι τις ομοιότητές τους με έναν συγκεκριμένο χαρακτήρα, τόσο περισσότερο

τείνουν να τους αρέσει αυτός, χαρακτηριστικό το οποίο φαίνεται να ισχύει και για παίκτες βιντεοπαιχνιδιών [20].

Η βιομηχανία των βιντεοπαιχνιδιών δεν θα μπορούσε να μην εκμεταλλευτεί το προαναφερθέν γεγονός, στρέφοντας το ενδιαφέρον της σε παιχνίδια με έναν κεντρικό χαρακτήρα με τον οποίο θα μπορούσε να ταυτιστεί ο παίκτης, κι επομένως να του αρέσει περισσότερο, πετυχαίνοντας ρεαλιστικότερα γραφικά για μια πιο φαντασμαγορική εμπειρία.



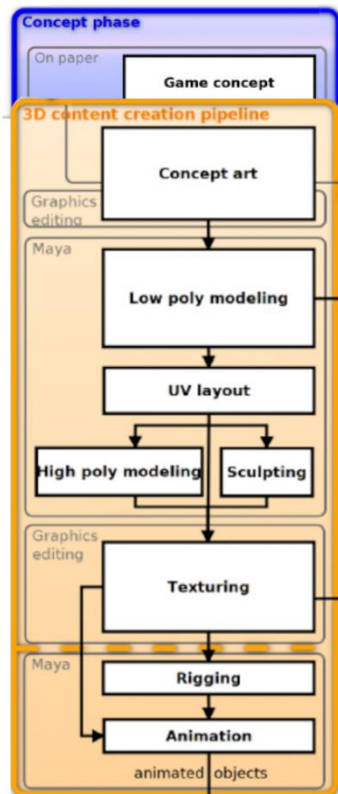
Εικόνα 5 Η Αλόη από το παιχνίδι Horizon Zero Dawn [82]

Για να ταυτιστεί όμως ο παίκτης λόγω ομοιοτήτων με τον πρωταγωνιστή ενός βιντεοπαιχνιδιού είναι αναγκαίο ο δεύτερος να πείθει τον παίκτη πως πρόκειται για έναν ρεαλιστικό χαρακτήρα που θα συναντούσε στην κανονική ζωή, κι όχι μια καρικατούρα με μεγάλο κεφάλι, κάποιο ζώο που μιλάει ή κάποιον άνθρωπο ζωγραφισμένο με μερικές δεκάδες χρωμάτων λιγοστών εικονοστοιχείων.

Για τον λόγο αυτόν, κάθε χαρακτήρας σχεδιάζεται προσεκτικά, συλλέγονται αρκετές αναφορές και εικόνες με τα χαρακτηριστικά που επιθυμεί ο σχεδιαστής, κάνοντας τον χαρακτήρα λιγότερο ή περισσότερο μυώδη, με το καλύτερο στυλ και ντύσιμο για την περίσταση που θα βρίσκεται, με στόχο να μοιάζει γνώριμος με την πρώτη ματιά στο ευρύ κοινό που θα παίξει το παιχνίδι. Παρατηρούμε λοιπόν ότι υπάρχουν λεπτομέρειες που πλάθουν τον χαρακτήρα δίνοντάς του την δική του προσωπικότητα [21][22].

2.2 Στάδια δημιουργίας ανθρώπινου μοντέλου

2.2.1 Εισαγωγή



Εικόνα 6 Γράφος σταδίων σχεδίασης και δημιουργίας μοντέλων [23].

Αρκετά πιο πολύπλοκη είναι στις μέρες μας η διαδικασία σχεδίασης και δημιουργίας τρισδιάστατων ρεαλιστικών χαρακτήρων για βιντεοπαιχνίδια υψηλού οικονομικού προϋπολογισμού. Αρχικά, συλλέγονται πλήθος από εικόνες αναφοράς που βοηθούν στην ανατομία, την σιλουέτα, παρόμοιους χαρακτήρες οι οποίες βοηθούν τους καλλιτέχνες να συλλάβουν την ιδέα τους και να την αποτυπώσουν σε ψηφιακό ή πραγματικό χαρτί (Concept art). Στη συνέχεια μοντελοποιείται ένα αντικείμενο τριών διαστάσεων με λιγοστά σημεία (Low poly modelling) στον χώρο xyz (3D) με βάση τις εικόνες του προηγούμενου σταδίου. Έπειτα, το μοντέλο χρειάζεται χαρτογράφηση μετατρέποντας τις τρισδιάστατες συντεταγμένες σε δισδιάστατες έτσι ώστε να εφαρμοστούν οι υφές και τα χρώματα ευκολότερα (UV-Unwrapping & Layout). Για περισσότερο ρεαλισμό και λεπτομέρειες που κάνουν τον χαρακτήρα αληθοφανή, ξεγελώντας και

τους πιο απαιτητικούς, σε γραφικά, παίκτες, προστίθενται οι λεπτομέρειες με την τεχνική της ψηφιακής γλυπτικής (Sculpting) και του μοντελισμού υψηλής ανάλυσης-λεπτομέρειας (High poly modeling) μέσω των υφών και της χαρτογράφησης (Texturing-Baking). Το μοντέλο ζωγραφίζεται και αποκτά διάφορες υφές όπως μέταλλο, δέρμα, ξύλο (Texturing). Εάν πρόκειται για δυναμικό μοντέλο, δηλαδή εάν έχει κίνηση στην διάρκεια του παιχνιδιού και δεν μένει στατικό, ο σχεδιαστής του εφαρμόζει έναν σκελετό ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για την κίνηση (Rigging). Οι κινήσεις αυτές δημιουργούνται εγγράφοντας σε κάθε καρέ την θέση, την περιστροφή και την κλιμάκωση κάθε οστού του σκελετού που θα κινείται (Animation) [23].

Στα παραπάνω στάδια εφαρμόζονται πλήθος από αλγορίθμους και τεχνικές με τα οποία πρέπει να είναι εξοικειωμένος ο σχεδιαστής για την γρηγορότερη και αποτελεσματικότερη

περάτωση κάθε επιπέδου. Συνήθως κάθε στάδιο ανατίθεται στον κατάλληλο άνθρωπο που έχει εντρυφήσει στον συγκεκριμένο κλάδο και μόνο, για παιχνίδια που απαιτούν αρκετούς πόρους σε χρήμα και ανθρώπινο δυναμικό για να ολοκληρωθούν (AAA Games). Σε παιχνίδια χαμηλού κόστους και μικρών στούντιο (indie game studios), οι σχεδιαστές εμπλέκονται σε περισσότερα από ένα στάδια έχοντας σφαιρικές γνώσεις για πολλά από αυτά, όχι όμως τόσο εξειδικευμένες όπως στα προηγούμενου τύπου παιχνίδια.

Ο στόχος αυτής της διπλωματικής είναι να εξερευνήσει όλα αυτά τα στάδια κατασκευής ενός ρεαλιστικού χαρακτήρα για παιχνίδια υψηλού κόστους, έτσι ώστε να αναδείξει τα επαγγέλματα αυτά δείχνοντας μερικές από τις γνώσεις τεχνικών και αλγορίθμων που χρειάζεται το κάθε στάδιο-επαγγελματικός κλάδος.

Κεφάλαιο 3 Λογισμικό Blender

3.1 Τι είναι το λογισμικό Blender

Το Blender είναι ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα, δωρεάν για όλους με την άδεια GNU General Public License (GPL). Αυτό σημαίνει πως μπορείς να πουλήσεις οτιδήποτε δημιουργήσεις μέσα στο λογισμικό, χωρίς να μπορείς να πουλήσεις μια έκδοση του Blender¹ και να ζημιώσεις την κοινότητα του Blender. Χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη δημιουργία ταινιών κινουμένων σχεδίων, οπτικών εφέ, τέχνης, μοντέλων εκτυπωμένων σε 3D, κινούμενων γραφικών, διαδραστικών εφαρμογών 3D, εικονικής πραγματικότητας και, παλαιότερα, βιντεοπαιχνιδιών. Οι δυνατότητες του Blender περιλαμβάνουν τρισδιάστατη μοντελοποίηση, χαρτογράφηση συντεταγμένων από 3 σε 2 διαστάσεις, υφή και υλικά όπως μέταλλο κ.α., ψηφιακή ζωγραφική/σχεδίαση, προσομοίωση υγρών, φωτιάς, καπνού κ.α., προσομοίωση σωματιδίων, προσομοίωση απαλού σώματος (soft body), γλυπτική, κινούμενα σχέδια 2 διαστάσεων, απόδοση γραφικών (rendering), μίξη ψηφιακών εικόνων με πραγματικά βίντεο ώστε να είναι ρεαλιστική η τελική εικόνα, επεξεργασία βίντεο και σύνθεση. Το πρόγραμμα έλαβε πρόσφατα τεράστια ποσά χρηματοδότησης από εταιρείες βιντεοπαιχνιδιών όπως η Epic Games, εταιρίες λογισμικού όπως η Microsoft, εταιρείες hardware όπως η Nvidia κ.α. με αποτέλεσμα να είναι αρκετά ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλα λογισμικά κλειστού κώδικα και διανομής επί πληρωμή.

3.2 Δομή του Blender

Το Blender είναι δομημένο έτσι που αν κάποιος χρήστης θελήσει να χρησιμοποιήσει άλλο πρόγραμμα σε κάποια άλλα στάδια σχεδίασης να μπορεί να το κάνει. Για τον λόγο αυτό, προσφέρει λειτουργίες import/export (εισαγωγής/εξαγωγής) σε κατάλληλα μέσα.

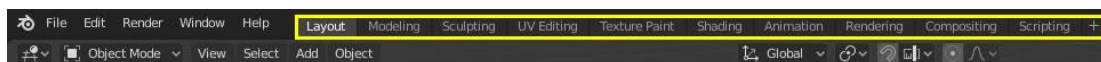
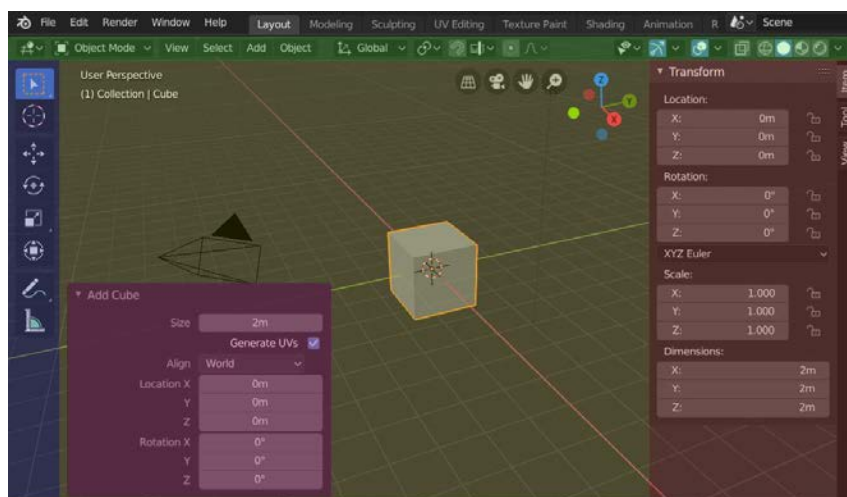
Έτσι, αν κάποιος χρήστης θέλει να ζωγραφίσει μια εικόνα σε άλλο πρόγραμμα όπως το Adobe Photoshop, μπορεί να το κάνει χρησιμοποιώντας τη λειτουργία import και έτσι μπορεί να το εισάγει μέσα στο Blender χωρίς καμία παραμόρφωση ή άλλο πρόβλημα.

¹ [https://en.wikipedia.org/wiki/Blender_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Blender_(software))

Το πρόγραμμα έχει χωριστεί σε περιβάλλοντα εργασίας ή αλλιώς workspaces τα οποία αποτελούνται από περιβάλλοντα μοντελισμού, γλυπτικής, υφής και κίνησης οργανώνοντας καλύτερα τις μεθόδους και τις λειτουργίες του κάθε σταδίου έτσι ώστε να διευκολύνει τον σχεδιαστή προσφέροντάς του ένα άνετο περιβάλλον.

3.2.1 Γενικό περιβάλλον-Layout

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το αρχικό περιβάλλον εργασίας με το οποίο ανοίγει το λογισμικό. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει το αρχικό περιβάλλον που θα εμφανίζεται κατά την εκκίνηση αφού το λογισμικό αυτό είναι αρκετά παραμετροποιήσιμο μέσω των προτιμήσεων (Preferences) στο μενού Edit [24][25].



Εικόνα 7 Επεξήγηση του γραφικού περιβάλλοντος (πάνω). Καρτέλες επιλογής περιβάλλοντος εργασίας (κάτω) [24][25]

Με κίτρινο χρώμα αναπαρίσται η κεντρική τρισδιάστατη σκηνή όπου υπάρχουν όλα τα αντικείμενα. Κάθε οντότητα στην σκηνή, είτε τύπου λάμπας, είτε τύπου κάμερας ή τύπου μοντέλου, είναι ένα αντικείμενο που περιέχει πληροφορίες θέσης, περιστροφής και κλιμάκωσης και άλλες πληροφορίες, ανάλογες με τον τύπο του αντικειμένου. Επάνω από το κίτρινο βρίσκονται οι καρτέλες για την επιλογή του περιβάλλοντος εργασίας [26].

Με κόκκινο χρώμα φαίνεται το χρονοδιάγραμμα το οποίο είναι υπεύθυνο για την διαχείριση της κίνησης των αντικειμένων. Σε αυτό, ο χρήστης μπορεί να θέσει κάποια σημεία στον χρόνο τα οποία μπορούν να προσδιορίσουν την θέση, την περιστροφή και την κλιμάκωση ενός αντικειμένου. Επίσης, με τα κουμπιά στην μέση, μπορεί ο σχεδιαστής να τρέξει τον χρόνο, να τον παγώσει, να πάει σε επόμενο ή προηγούμενο καρέ.

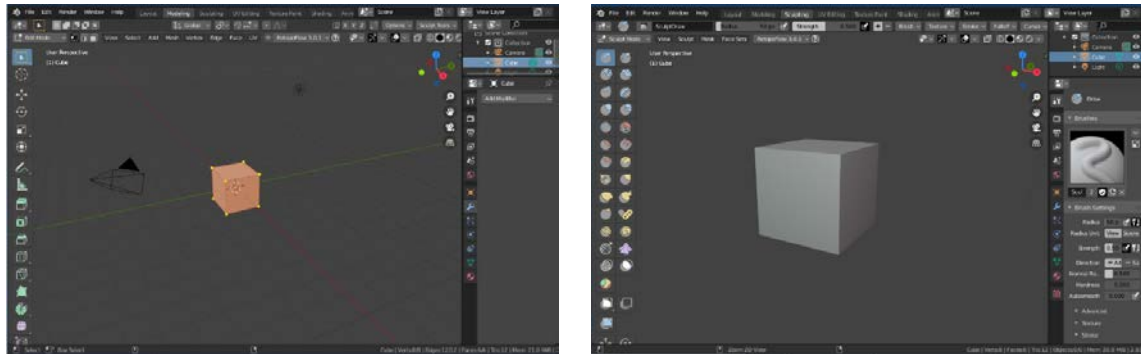
Η όψη των Ιδιοτήτων (Properties) είναι με μπλε χρώμα και αποτελείται από πλήθος ρυθμίσεων γενικών δεδομένων όπως ο φωτισμός της σκηνής, παραμέτρους αποτύπωσης (rendering) και ρυθμίσεις σχετικά με την επιλογή μονάδας μήκους και άλλα. Ακόμα, παρέχει ειδικότερες ρυθμίσεις για κάθε αντικείμενο που είναι επιλεγμένο από τον χρήστη όπως το υλικό του, τις συντεταγμένες του, τις παραμορφώσεις του (modifiers) και όλα τα δεδομένα που μπορούν να μεταβληθούν από τον χρήστη.

3.2.2 Περιβάλλον Εργασίας Μοντελισμού και Γλυπτικής

Το περιβάλλον εργασίας μοντελισμού παρέχει όλα τα εργαλεία πολυγωνικού μοντελισμού, τις λειτουργίες και τους αλγορίθμους που χρειάζεται ένας σχεδιαστής προκειμένου να δημιουργήσει μοντέλα χαμηλού και μέσου αριθμού πολυγώνων. Αριστερά υπάρχει η γραμμή εργαλείων με τις λειτουργίες μετασχηματισμού της θέσης, της περιστροφής και της κλιμάκωσης, τις λειτουργίες επιλογής αντικειμένων με κύκλο ή ορθογώνιο (circle/box select), και τα εργαλεία τροποποίησης των δεδομένων σε λειτουργία επεξεργασίας (edit mode) του μοντέλου όπως τα σημεία, τις ακμές και τα πολύγωνα που το αποτελούν. Συνήθως είναι το πρώτο περιβάλλον που ανοίγουν οι σχεδιαστές μιας και είναι ένας καλός τρόπος να ξεκινήσει κάποιος το μοντέλο του.

Μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιούν πολλοί σχεδιαστές είναι η ψηφιακή γλυπτική. Ο στόχος αυτής είναι να δώσει μεγαλύτερη ελευθερία στον σχεδιαστή, σε αντίθεση με την τεχνική του πολυγωνικού μοντελισμού [27]. Ένας άλλος λόγος να ασχοληθεί κάποιος με την γλυπτική είναι εάν θέλει να προσθέσει περισσότερες και μικρότερες λεπτομέρειες με στόχο τη μεγαλύτερη ρεαλιστικότητα. Εκεί θα βρει τις διάφορες και ενδιαφέρουσες βούρτσες γλυπτικής με τις οποίες μπορεί να παράξει αποτελέσματα, ισάξια με αυτά της γλυπτικής στον πραγματικό κόσμο δίχως την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Στην ίδια θέση που υπάρχει η γραμμή εργαλείων με τις λειτουργίες μοντελισμού, που είδαμε προηγουμένως, είναι και η γραμμή με τις βούρτσες αυτές, γίνεται δηλαδή εναλλαγή

μεταξύ τους. Ενδεικτικά φαίνονται οι εικόνες με τα προαναφερθέντα περιβάλλοντα μοντελισμού και γλυπτικής.

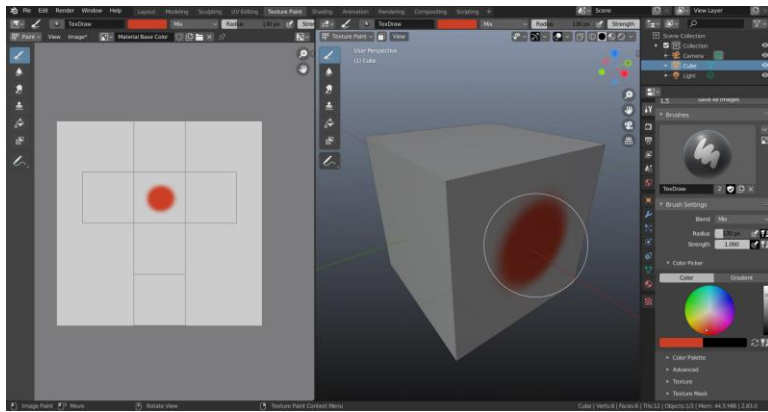


Εικόνα 8 Περιβάλλον Εργασίας Μοντελισμού(αριστερά) και Περιβάλλον Εργασίας Ψηφιακής Γλυπτικής (δεξιά) μέσα από το λογισμικό Blender.

3.2.3 Περιβάλλον Εργασίας Χαρτογράφησης και Χρωματισμού των Υφών

Στο περιβάλλον χαρτογράφησης, ο χρήστης χαρτογραφεί τα σημεία του τρισδιάστατου χώρου που αποτελούν το τρισδιάστατο μοντέλο του σε δισδιάστατες συντεταγμένες u και v με κατάλληλους αλγορίθμους και τεχνικές έτσι ώστε να εφαρμόσει υφές από εικόνες και υλικά. Η διαδικασία αυτή ομοιάζει με την κοπή του χαρτιού σε κατάλληλα σημεία έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο όπως ένα αεροπλανάκι ή ένα σπίτι αφού διπλωθεί καταλλήλως.

Με το άνοιγμα αυτού του περιβάλλοντος, ο χρήστης θα αντικρίσει μια όψη όπου γίνεται επεξεργασία των 2d συντεταγμένων αριστερά, και δεξιά την όψη της σκηνής με το 3d μοντέλο του σε λειτουργία επεξεργασίας (edit mode). Στο περιβάλλον χρωματισμού των υφών, ο καλλιτέχνης έχει μια παλέτα από χρώματα με τα οποία μπορεί να ζωγραφίσει το μοντέλο του στην τρισδιάστατη σκηνή στα δεξιά και τα χρώματα να μεταφερθούν αυτόματα από το λογισμικό στην εικόνα αριστερά, βάση των 2d συντεταγμένων.

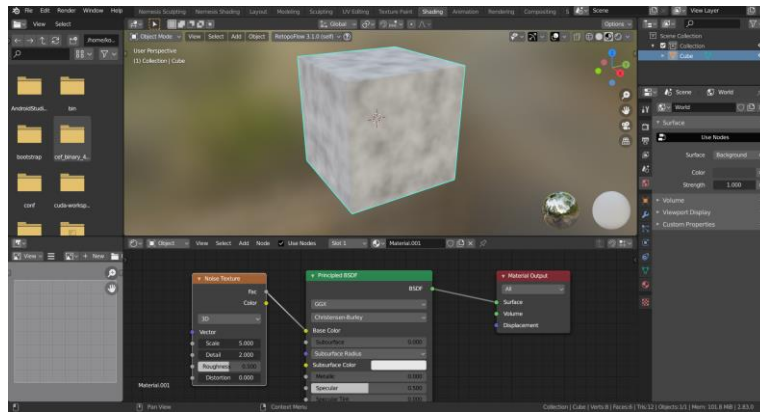


Εικόνα 9 Περιβάλλον Εργασίας Χαρτογράφησης Συντεταγμένων και Χρωματισμού μέσα από το λογισμικό Blender.

3.2.4 Περιβάλλον Εργασίας Σκίασης και Δημιουργίας Υλικών

Σημαντικό ρόλο, στον τομέα του χρωματισμού του μοντέλου μας, κατέχει η τεχνική της δημιουργίας υφών και χρωμάτων διαδικαστικά (procedurally) χρησιμοποιώντας shaders, ειδικά λογισμικά που τρέχουν στην κάρτα γραφικών του υπολογιστή [27].

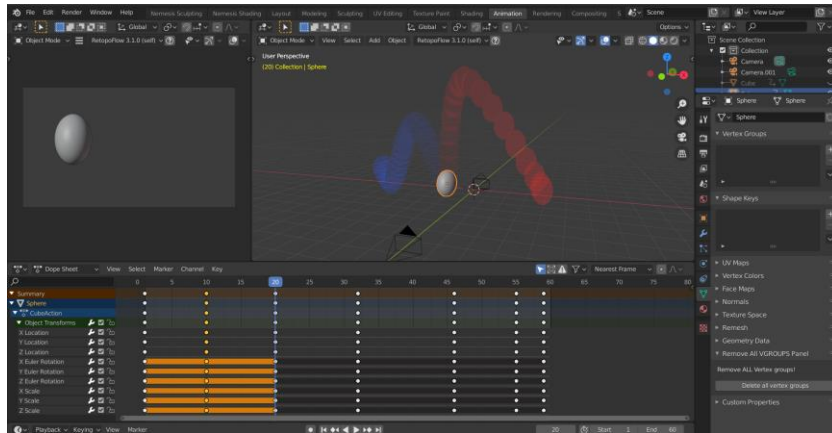
Αυτήν την όψη παρέχει το περιβάλλον εργασίας Σκίασης (Shading), προσφέροντας στον καλλιτέχνη έναν εύκολο τρόπο να προγραμματίσει αυτές τις υφές με την βοήθεια ενός συστήματος κόμβων (node based system). Στο σύστημα αυτό, ο χρήστης συνδέει κόμβους κατάλληλα δημιουργώντας ρεαλιστικές και μη υφές. Αργότερα μπορεί να τις αποθηκεύσει σαν εικόνες με την τεχνική του “ψησίματος” εικόνας (image baking) και να τις επαναχρησιμοποιήσει σε άλλες υφές. Παρακάτω φαίνεται αυτό το περιβάλλον με το σύστημα κόμβων να βρίσκεται στο κάτω μέρος της οθόνης και την σκηνή στο επάνω και αριστερά βρίσκονται οι φάκελοι του υπολογιστή του χρήστη για εισαγωγή εικόνων.



Εικόνα 10 Σύστημα δημιουργίας υφών με κόμβους (node based system) μέσα από το λογισμικό Blender

3.2.5 Περιβάλλον Εργασίας Κίνησης

Τα ζωντανά αντικείμενα, δηλαδή αυτά τα οποία έχουν κίνηση όπως ο άνθρωπος και τα ζώα, έχουν τον σκελετό τους ο οποίος καθορίζει ποιες κινήσεις μπορούν να κάνουν και ποιες όχι. Όμως αν πρέπει να δοθεί κίνηση σε μια μπάλα ποδοσφαίρου προσομοιώνοντας την επίδραση της βαρύτητας που δέχεται, τότε δεν χρειάζεται κάποιος σκελετός αλλά διάφοροι φυσικοί νόμοι όπως ο νόμος της βαρύτητας, της κρούσης, της ελαστικότητας κ.α.. Το Blender προσφέρει ένα περιβάλλον κίνησης στο οποίο ο χρήστης θέτει κάποια σημεία στην χρονογραμμή (timeline) που βρίσκεται στο κάτω μέρος της οθόνης. Αυτά τα σημεία προσδιορίζουν την θέση, την περιστροφή και την κλιμάκωση για το εκάστοτε καρέ του χρόνου. Έτσι ο χρήστης μπορεί να δώσει την ψευδαίσθηση πως λειτουργούν οι παραπάνω νόμοι ή να εφαρμόσει μερικούς αλγορίθμους που προσομοιώνουν αυτά τα φαινόμενα (simulation). Αυτό το περιβάλλον εργασίας αποτελείται από το επάνω μέρος της οθόνης, όπου ο σχεδιαστής μπορεί να δει τα αποτελέσματα του αντικειμένου του στη σκηνή, δεξιά μετακινείται στον χώρο βλέποντας τα αποτελέσματα από πολλές πλευρές ενώ αριστερά μέσω της προβολής της κάμερας. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ενδεικτικά το περιβάλλον.

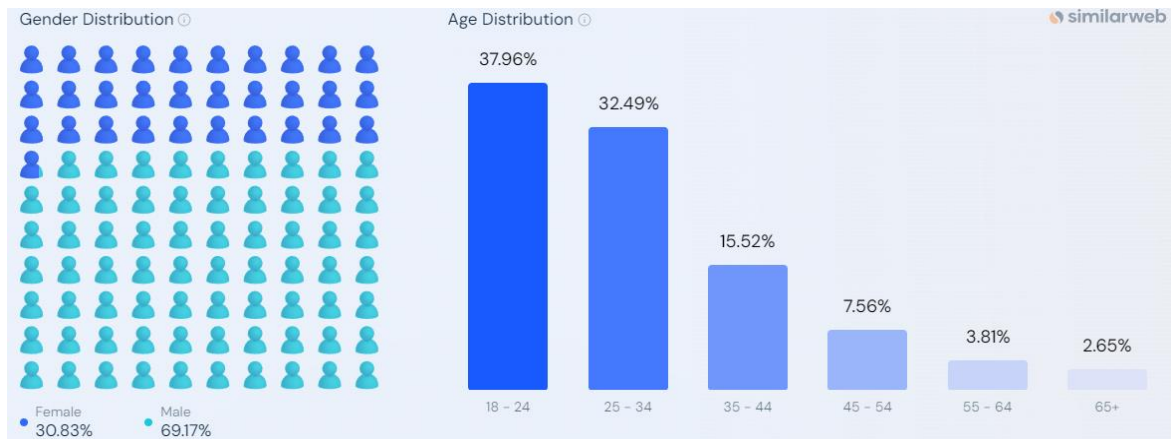


Εικόνα 11 Περιβάλλον Εργασίας Κίνησης μέσα από το λογισμικό Blender

3.3 Σε ποιους απευθύνεται

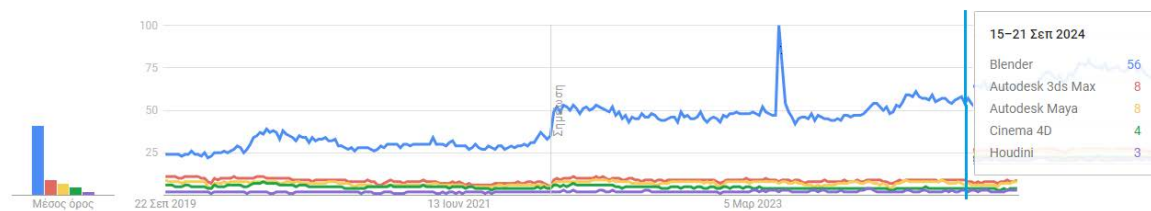
Απευθύνεται πρωτίστως σε αρχάριους χρήστες μιας και είναι δωρεάν, εύκολο στην εκμάθηση και έχει τον κώδικά του ανοιχτό για να τον εξετάσει και να τον τροποποιήσει ο καθένας, αλλά και σε επαγγελματίες του χώρου. Τα τελευταία χρόνια προσπαθεί να ενταχθεί στον επαγγελματικό χώρο έχοντας λάβει σημαντικές ενημερώσεις που το καθιστούν εξίσου ισχυρό με τους ανταγωνιστές του. Πρόκειται δηλαδή για ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα κάνοντας το εξαιρετικά γρήγορο σε παραγωγή νέων εκδόσεων αφού πολλοί προγραμματιστές από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου μπορούν και έχουν συνεισφέρει. Ο αριθμός που εγκαταστάθηκε το λογισμικό για το προηγούμενο έτος, σύμφωνα με την ετήσια αναφορά του Blender Foundation έφτασε συνολικά τα 18 εκατομμύρια [28].

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, φαίνεται πως οι χρήστες που προτιμούν αυτό το λογισμικό είναι από ανθρώπους ηλικίας 18-24 ετών, με τις γυναίκες να αποτελούν προσεγγιστικά τον μισό πληθυσμό χρηστών εξ' αυτών. Ακολουθεί ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό των χρηστών στην κατηγορία ηλικίας 25-34 και έπονται οι άνθρωποι μετά τα 34. Τέλος, υπάρχουν αρκετοί άνθρωποι άνω των 50 που ασχολούνται κυρίως με το Blender σαν χόμπι καθώς και όσοι δεν έχουν ενηλικιωθεί θέλοντας να κυνηγήσουν μια ανάλογη καριέρα. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των ανθρώπων όπως το φύλο και η ηλικία που έχουν οι χρήστες που κατέβασαν το λογισμικό [29].



Εικόνα 12 Δημογραφικά στοιχεία με βάση την ηλικία και το φύλο των χρηστών [29].

Παρακάτω φαίνεται το ενδιαφέρον των χρηστών για τα πιο γνωστά λογισμικά τρισδιάστατου περιεχομένου όπως Blender, 3ds Max, Maya, Cinema4D, Houdini και η σύγκριση αυτών ως προς την αναζήτηση των χρηστών στην μηχανή αναζήτησης Google σύμφωνα με το Google Trends για τα τελευταία 5 έτη [30].



Εικόνα 13 Ενδιαφέρον των χρηστών σε λογισμικά 3d περιεχομένου [30].

Κεφάλαιο 4 Μοντελισμός και Γλυπτική

Η διαδικασία για να σχεδιαστεί ένας χαρακτήρας, όπως προαναφέρθηκε, ξεκινάει από τη σύλληψη της ιδέας, την αποτύπωσή της στο χαρτί με κάποια προσχέδια καθώς και με τη συλλογή διάφορων βοηθητικών φωτογραφιών από το διαδίκτυο παρεμφερή με το θέμα του μοντέλου μας. Μιας και το κομμάτι αυτό είναι αμιγώς καλλιτεχνικό, χωρίς εμπλοκή αλγορίθμων και προγραμματιστικών εργαλείων, θα αναφερθεί ελάχιστα σε αυτήν την εργασία.

Με τη σύλληψη και αποτύπωση της ιδέας που πρόκειται να υλοποιηθεί, το πρώτο και σημαντικότερο κομμάτι στην διαδικασία σχεδιασμού είναι ο μοντελισμός, δηλαδή η διαδικασία παραγωγής ενός σωστού ανατομικά μοντέλου που θα θέσει την περεταίρω επεξεργασία του μοντέλου πιο εύκολη προς την επίτευξη ενός ρεαλιστικού αποτελέσματος. Σε αυτήν την διαδικασία, ο μοντελιστής χρησιμοποιεί εργαλεία και αλγορίθμους που στοχεύουν στην πρόσθεση και κατάλληλη τοποθέτηση των σημείων (vertices), ακμών (edges) και όψεων (faces) ώστε το πλέγμα (mesh) που θα προκύψει να είναι έτοιμο για τα επόμενα στάδια σχεδίασης.

4.1 Μοντελισμός

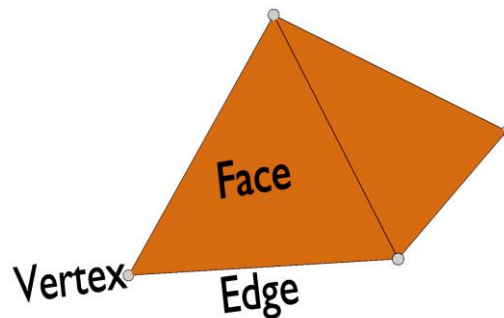
Η μοντελοποίηση τρισδιάστατων αντικειμένων είναι βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές αλλά και επιστημονικές έρευνες. Αρκετά είδη λογισμικού και εργαλείων εμπλέκονται σε αυτήν την προσέγγιση. Είναι σημαντική μέθοδος για την επιστήμη, τον κινηματογράφο, τους δημιουργούς βιντεοπαιχνιδιών καθώς και όσους ασχολούνται με την παραγωγή εικόνων μέσω του υπολογιστή.

Ο μοντελισμός μπορεί να γίνει σε πολλά λογισμικά όπως το Maya της εταιρείας Autodesk, το Houdini της SideFX, το Blender της Blender Foundation, το Cinema4D της Maxon και το Zbrush της Pixologic.

Ένα τρισδιάστατο αντικείμενο αποτελείται από vertices(σημεία), edges (ακμές) και faces (όψεις).

- Vertex (πληθυντικός vertices) είναι ένα σημείο στον τρισδιάστατο χώρο.
- Edge είναι μια ευθεία γραμμή που ενώνει δύο vertices.

- Face είναι μια επίπεδη επιφάνεια περιβαλλόμενη από edges.



Εικόνα 14 Επεξήγηση ορολογίας τρισδιάστατου αντικειμένου μέσω του λογισμικού Blender

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στα βιντεοπαιχνίδια είναι διαφορετικά από εκείνα του κινηματογράφου διότι στις ταινίες, τα μοντέλα αυτά αποτυπώνονται σε εικονοστοιχεία καλύπτοντας την οθόνη μια φορά σε ψηφιακή μορφή και όσον το δυνατόν πιο ρεαλιστικά, ενώ στα παιχνίδια, τα μοντέλα πρέπει να αποτυπωθούν στην οθόνη του παίκτη καρέ-καρέ σε πραγματικό χρόνο με την δυνατότερη υψηλή ποιότητα γραφικών.

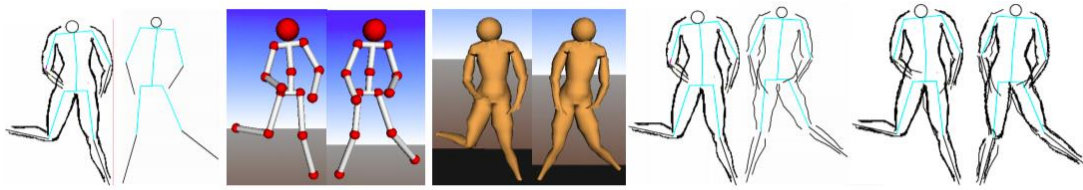
Την λύση αυτού του προβλήματος παρατήρησαν οι Hussain & Okada (2005) [31] χρησιμοποιώντας την τεχνική της δημιουργίας πολλαπλών εκδόσεων του μοντέλου με διαφορετικό επίπεδο λεπτομέρειας, ακρίβειας και πολυπλοκότητας (LOD-Level of Detail) μέσω κατάρρευσης ακμών (Edge collapsing).

Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του αλγορίθμου είναι ότι διατηρεί τα σημαντικά χαρακτηριστικά ενός μοντέλου και την σιλουέτα του ακόμη και το πιο χαμηλό επίπεδο λεπτομέρειας.

Αποτέλεσμα αυτής την τεχνικής είναι ότι ο χρήστης βλέπει ένα λεπτομερέστατο αντικείμενο όταν αυτό βρίσκεται πολύ κοντά στην εικονική κάμερα του παιχνιδιού-εφαρμογής και μια όλο και πιο απλούστερη προσέγγιση όταν το αντικείμενο απομακρύνεται από την κάμερα, ανάλογα με την απόσταση από την κάμερα του παίκτη χωρίς ιδιαίτερο υπολογιστικό κόστος.

Ένα σημαντικό εργαλείο για δημιουργία γρήγορων πρωτοτύπων δημιούργησαν οι ερευνητές Mao et al. (2007) [32]. Πρόκειται για μια εφαρμογή που ο χρήστης μπορεί να ζωγραφίσει ένα ανθρώπινο σώμα σε δύο διαστάσεις και η εφαρμογή να το μετατρέψει σε

τρισδιάστατο. Συγκεκριμένα δημιούργησαν ένα ανατομικά γενικό τρισδιάστατο σώμα το οποίο θα προσαρμόζεται με βάση το σκίτσο του χρήστη.



Εικόνα 15 Εφαρμογή που μετατρέπει μια ζωγραφιά ανθρωπίνου σώματος σε τρισδιάστατο αντικείμενο [32].

Αυτού του είδους τα εργαλεία βοηθούν σημαντικά τον σχεδιαστή στα αρχικά στάδια υλοποίησης ενός παιχνιδιού όπως αυτό του Concept Art, όπου δημιουργούνται γενικά μοντέλα στα οποία προστίθενται περαιτέρω λεπτομέρειες.

Υπάρχουν πολλά είδη ψηφιακού μοντελισμού, εξίσου ικανών για επαγγελματικά αποτελέσματα, καθένα ιδανικό για τον τύπο σχήματος και το επίπεδο λεπτομέρειας που θέλει κάποιος να επιτύχει [33].

1. Box modeling/Polygon modeling
2. Nurbs and curve modeling
3. Digital 3D Sculpting
4. Photogrammetry
5. Simulation
6. Procedural modeling
7. Boolean modeling
8. Kit bashing

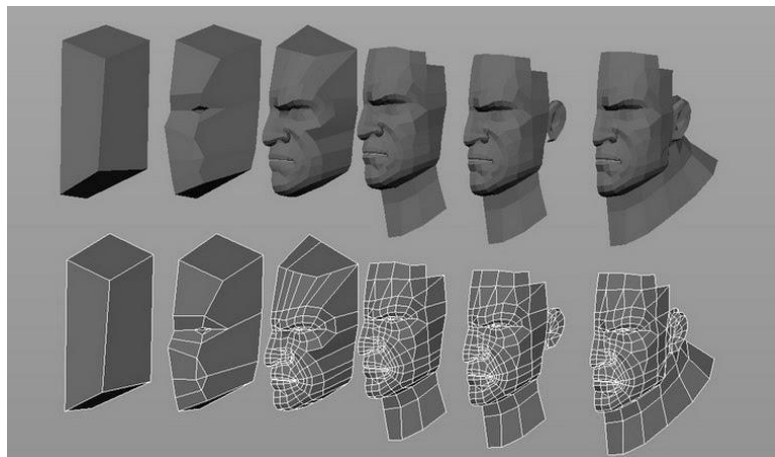
4.1.1 Box/Polygonal modeling

Η διαδικασία του box modeling εκκινεί από ένα απλό πρωτόγονο σχήμα όπως ένας κύβος ή μια σφαίρα και με τη χρήση των κλασικών εργαλείων μοντελισμού παράγεται το σχήμα επιλογής. Χαρακτηριστικό στοιχείο αυτού του τύπου δημιουργίας σχημάτων είναι ο έλεγχος κάθε σημείου, ακμής και κορυφής για το επιθυμητό αποτέλεσμα. Συνήθως δίδεται μεγαλύτερη έμφαση στον μετασχηματισμό μεγάλου μέρους ενός αντικειμένου παρά στον μεμονωμένο μετασχηματισμό ξεχωριστών κορυφών. Επίσης, τα πολύγωνα που

αποτελούνται από τέσσερις ακριβώς κορυφές (quads) προτιμώνται, μιας και είναι ιδανικά για την εφαρμογή περεταίρω αλγορίθμων όπως ο Subdivision Surfaces στην πορεία.

Αυτή η τεχνική λειτουργεί καλύτερα για αντικείμενα σκληρών επιφανειών όπως αρχιτεκτονικές κατασκευές και βιομηχανικά εργαλεία.

Παρακάτω φαίνεται μια εικόνα με τα στάδια μοντελισμού μέσω της τεχνικής Box Modeling. Ξεκινώντας από ένα κουτί (μισό λόγω εφαρμογής συμμετρίας) και μέσω των εργαλείων τροποποίησης σημείων, ακμών αλλά κυρίως όψεων καταλήγει το τελικό μοντέλο ενός προσώπου.



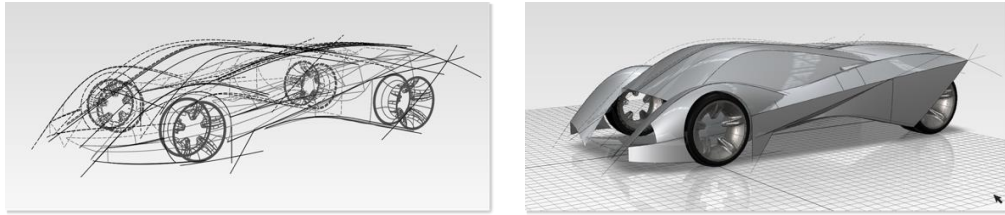
Εικόνα 16 Στάδια της τεχνικής του Box Modeling [34]

4.1.2 Nurbs and curve modeling

Nurbs ή Non-uniform rational b-splines ονομάζονται οι μαθηματικές καμπύλες που χρησιμοποιούνται για καμπυλωτές επιφάνειες οι οποίες ελέγχονται από ένα σύνολο σημείων ελέγχου. Η λογική είναι η εξής:

- Περιγράφεται ένα αντικείμενο με τη χρήση ενός συνόλου καμπυλών περιμετρικά και αργότερα γεμίζει κάθε καμπύλη με την αμέσως κοντινότερη δημιουργώντας μια γέφυρα.
- Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε λογισμικά που έχουν σχέση με μηχανικούς και CAD (Computer Aided Design) λογισμικά για τη δημιουργία βιομηχανικών αντικείμενων όπως αυτοκίνητα αλλά δε χρησιμοποιείται σε παραγωγές για βιντεοπαιχνίδια ή ταινίες.
- Τα εργαλεία είναι εντελώς διαφορετικά από τις προηγούμενες τεχνικές, όπως κλείσιμο μιας καμπύλης, δημιουργία γέφυρας με μια άλλη, δημιουργία γεφυρών με περιστροφή σε κάποιον άξονα(sweep) κ.α..

Παρακάτω αναδεικνύεται το στάδιο σχεδίασης των καμπυλών και μετατροπή αυτών σε επιφάνειες.



Εικόνα 17 Σχεδίαση καμπυλών-curves (αριστερά) και γέμιση αυτών με επιφάνειες-surfaces (δεξιά) για τον σχεδιασμό ενός μοντέλου αυτοκινήτου [35]

4.1.3 Digital 3D Sculpting

Πρόκειται για μια πιο καλλιτεχνική προσέγγιση δημιουργίας αντικειμένων. Προσομοιάζει την κανονική γλυπτική με πηλό. Έναντι του μετασχηματισμού ενός συνόλου κορυφών χρησιμοποιούνται οι βούρτσες, καθεμιά με την ακτίνα επιρροής της και με τη δική της ξεχωριστή λειτουργία όπως Move, Flatten, Smooth κ.α..

Εφαρμόζεται ευρέως σε οργανικά σχέδια όπως ανθρώπινοι χαρακτήρες, ζώα, οποιαδήποτε άλλα πλάσματα και είναι ιδανικό για καλλιτέχνες.

Πλεονέκτημα του είναι πως αποδίδει εξαιρετική λεπτομέρεια με ευκολία, εν αντιθέσει με τις κλασικές μεθόδους box modeling.

Στην επόμενη φωτογραφία απεικονίζεται ένας βάτραχος, μοντέλο οργανικού τύπου, σχεδιασμένο στο λογισμικό ZBrush.



Εικόνα 18 Αποτέλεσμα μοντέλου ψηφιακής γλυπτικής από τον καλλιτέχνη Meng Wang [36]

4.1.4 Photogrammetry

Η τεχνική μοντελοποίησης με τη χρήση μιας κάμερας στην πραγματική ζωή και τις διαφορετικές λήψεις ενός πραγματικού αντικειμένου ονομάζεται Photogrammetry.

Η διαδικασία αποτελείται από τη λήψη φωτογραφιών που θα έχουν στο επίκεντρο τους το αντικείμενο επιλογής από πολλές διαφορετικές οπτικές γωνίες. Το σύνολο των φωτογραφιών αυτών επεξεργάζεται από κάποιον αλγόριθμο τριγωνοποίησης και παράγεται ένα σύνολο σημείων που με την περαιτέρω χρήση αλγορίθμων παράγεται ένα πλέγμα. Με τη χρήση του Remesh (επαναδημιουργία πλέγματος) και την εφαρμογή των χρωμάτων ως υφές από τις λήψεις καθίσταται ικανό να χρησιμοποιηθεί σε κάποιο βιντεοπαιχνίδι.

Κύρια μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι η εύρεση ομοιόμορφου φωτισμού του περιβάλλοντος καθώς και το μέγεθος ενός αντικειμένου. Όσο μεγαλύτερο το μέγεθος, τόσο πιο δύσκολη καθίσταται η λήψη φωτογραφιών από πολλές οπτικές γωνίες (π.χ. βουνό).

Επίσης με την παρεμβολή περαιτέρω δευτερευόντων αντικειμένων, ο καλλιτέχνης καλείται να ξεχωρίσει το κύριο αντικείμενο από τα ανεπιθύμητα με την διαγραφή συνόλων κορυφών με το χέρι.

Χρησιμοποιείται για αντικείμενα της φύσης όπως δέντρα, στατικά αντικείμενα, έδαφος, προϊόντα επίδειξης κ.α..

Στην επόμενη εικόνα αναδεικνύεται ένα μοντέλο σπιτιού που έχει επιτευχθεί από την σύνθεση πολλαπλών εικόνων από διαφορετικές οπτικές γωνίες μέσω της τεχνικής αυτής.



Εικόνα 19 Μοντελοποίηση σπιτιού με την λήψη πολλαπλών φωτογραφιών [37]

4.1.5 Simulation

Με τον όρο προσομοίωση (simulation) εννοείται η κατάλληλη τοποθέτηση των αντικειμένων και η εφαρμογή των κατάλληλων τιμών στις παραμέτρους της μηχανής προσομοίωσης.

Συνήθως χρησιμοποιείται για την κατασκευή υλικών όπως τα ρούχα ενός χαρακτήρα, τα μαξιλάρια ενός σπιτιού για ένα αρχιτεκτονικό σχέδιο, την προσομοίωση υγρών στοιχείων όπως ένας ωκεανός, την φωτιά και τα διάφορα ειδικά εφέ ενός όπλου σε παιχνίδι ή σε ταινία.

Σημαντική διαφορά με τις προηγούμενες τεχνικές μοντελοποίησης είναι ότι ο χρήστης δεν χρησιμοποιεί εργαλεία αλλά τροποποιεί παραμέτρους, αναλόγως και τον τύπο αντικειμένου που επιθυμεί να προσομοιάσει, και περιμένει αρκετή ώρα για την ολοκλήρωση των υπολογισμών της μηχανής.

Παρακάτω απεικονίζεται μία προσομοίωση στο λογισμικό Blender για τη μοντελοποίηση ρεαλιστικού ωκεανού.



Εικόνα 20 Προσομοίωση ωκεανού με ελεγχόμενες παραμέτρους από τον χρήστη [38]

4.1.6 Procedural modeling

Διαδικαστική μοντελοποίηση (Procedural modeling) είναι συνήθως ένα σύστημα κόμβων που παράγει ένα αποτέλεσμα από τον τρόπο που ενώνονται οι επιμέρους κόμβοι και από τις τιμές των παραμέτρων που έχει θέσει ο χρήστης.

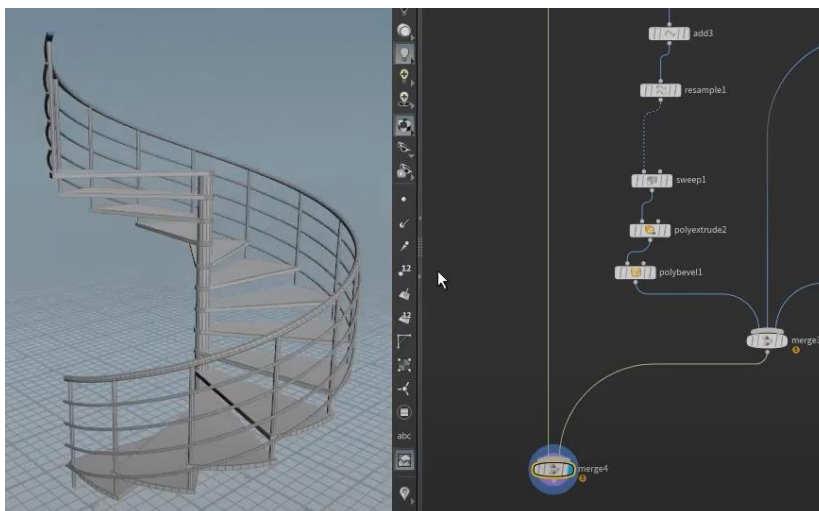
Είναι ιδανικό για δημιουργία αντικειμένων σκληρής επιφάνειας και μεταβλητού αριθμού στοιχείων όπως οι σκάλες, μια πολυκατοικία με n ορόφους.

Αυτή η τεχνική συνεργάζεται εξαιρετικά με τις προηγούμενες τεχνικές. Παραδείγματος χάριν, με την αλλαγή μερικών παραμέτρων, το σύστημα αυτό μπορεί να παράξει μια σκάλα με αριθμό σκαλιών ορισμένο από τον χρήστη και σχέδιο στα κάγκελα, αυτό που έχει ορίσει ο χρήστης με κάποιο αντικείμενο που παράχθηκε από Box modeling.

Η δυσκολία αυτού του συστήματος είναι η ένωση κατάλληλων κόμβων για την παραγωγή του επιθυμητού αποτελέσματος.

Το πλεονέκτημα φαίνεται πως είναι η παραμετροποιήσιμη φύση του με την γρήγορη αλλαγή μερικών παραμέτρων χωρίς να χρειαστεί να χαλάσει η σχεδίαση όπως με τις προηγούμενες τεχνικές.

Παρακάτω εμφανίζεται ένα παραμετρικό μοντέλο γυριστής σκάλας με ένα μέρος του γράφου που το παράγει.

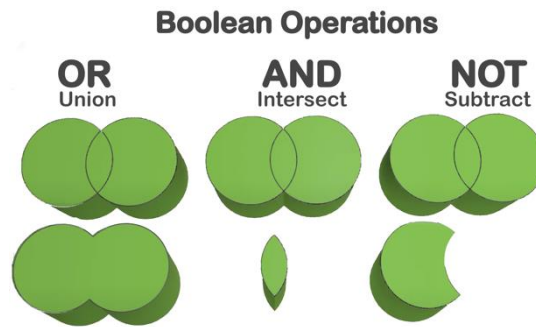


Εικόνα 21 Διαδικαστικός μοντελισμός σκάλας (αριστερά). Μέρος του συστήματος γράφου (δεξιά) [39]

4.1.7 Boolean modeling

Με την τεχνική του Boolean modeling ο καλλιτέχνης ξεκινάει με κάποιο βασικό μοντέλο όπως ο κύβος ή η σφαίρα και με την χρήση άλλων απλών μοντέλων συνδυάζει αυτά τα σχήματα εφαρμόζοντας τρεις βασικές λειτουργίες-τελεστές, όπως φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα.

1. Union (Ένωση)
2. Intersect (Τομή)
3. Subtract (Αφαίρεση)



Εικόνα 22 Ενδεικτικές λειτουργίες της Boolean modeling, από το λογισμικό Blender.

Ο τελεστής Ένωσης θα συγχωνεύσει δύο αντικείμενα μαζί και της Τομής θα σώσει μόνο τη γεωμετρία που μοιράζονται τα δύο αντικείμενα. Ο τελεστής Αφαίρεσης αφαιρεί το σχήμα και τον όγκο ενός αντικειμένου από ένα άλλο.

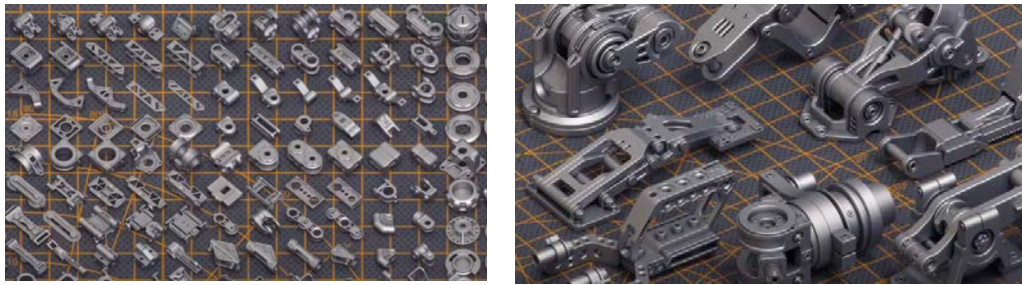
Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του είδους σχεδίασης είναι η εξοικονόμηση χρόνου και ταλαιπωρίας για να σχεδιαστούν αντικείμενα σκληρής επιφάνειας σε σχέση με άλλες προαναφερθείσες τεχνικές.

4.1.8 Kit Bashing

Η τεχνική αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη για κατασκευή αντικειμένων σκληρής επιφάνειας. Πρόκειται για τη γρήγορη σύνθεση του μοντέλου με κομμάτια άλλων μοντέλων που προσθέτουν αρκετή λεπτομέρεια σε αυτό χωρίς την επαναμοντελοποίηση τους.

Κύριο πλεονέκτημα είναι ο γρήγορος χρόνος υλοποίησης και η επαναχρησιμοποίηση κομματιών από άλλα μοντέλα. Επίσης, ο καλλιτέχνης δεν χρειάζεται να έχει στο νου του την τελική εικόνα που θέλει να υλοποιήσει αλλά μπορεί να πειραματίζεται με την προσθήκη διάφορων κομματιών και στο τέλος να επιλέξει ποια θα κρατήσει.

Παρακάτω απεικονίζεται η συλλογή από διάφορα εξαρτήματα όπως βίδες, κρίκοι και άλλα, καθώς και τα τελικά μοντέλα που παράγονται αν συνδυαστούν τα πρώτα καταλλήλως.



Εικόνα 23 Διάφορα μοντέλα εξαρτημάτων (αριστερά). Τελικά μοντέλα με τον κατάλληλο συνδυασμό των εξαρτημάτων (δεξιά) [40].

4.2 Βασικοί αλγόριθμοι μοντελισμού

Οι συνήθεις λειτουργίες που χρησιμοποιούνται στον μοντελισμό υλοποιούνται με αλγορίθμους που βασίζονται σε μαθηματικά, με πίνακες και διανύσματα του τρισδιάστατου χώρου.

4.2.1 Μετατόπιση, Περιστροφή και Κλιμάκωση

Αυτοί οι τρεις μετασχηματισμοί, στην Ευκλείδεια γεωμετρία, είναι γεωμετρικές μεταμορφώσεις οι οποίες δρουν πάνω σε ένα σημείο ή σε ένα σύνολο σημείων σε μια κατεύθυνση.

Προκειμένου να τοποθετηθούν στις σωστές θέσεις τα σημεία, ο σχεδιαστής εφαρμόζει τον πίνακα της μετατόπισης, της περιστροφής και της κλιμάκωσης των σημείων με τη βοήθεια των εργαλείων του blender (Translate, Rotate, Scale).

A. Μετατόπιση/Translate

Με αυτήν τη λειτουργία μπορούμε να μετατοπίσουμε ένα σημείο με την ίδια απόσταση σε μια δοθείσα κατεύθυνση στους άξονες x,y,z. Μπορούμε να τη φανταστούμε σαν την πρόσθεση ενός σταθερού διανύσματος σε κάθε σημείο, ή σαν την αλλαγή του σημείου προσδιορισμού του συστήματος συντεταγμένων (origin).

$$T_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & v_y \\ 0 & 0 & 1 & v_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Εικόνα 24 Πίνακας Translation/Μετατόπισης [41]

Για να μετακινηθεί ένα αντικείμενο από ένα διάνυσμα $\mathbf{v}$, κάθε ομοιογενές διάνυσμα $\mathbf{p}$ (γραμμένο σε ομοιογενείς συντεταγμένες) μπορεί να πολλαπλασιαστεί με αυτόν τον πίνακα μετατόπισης. Όπως φαίνεται παρακάτω, ο πολλαπλασιασμός θα δώσει το αποτέλεσμα:

$$T_{\mathbf{v}}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & v_y \\ 0 & 0 & 1 & v_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x + v_x \\ p_y + v_y \\ p_z + v_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{p} + \mathbf{v}$$

Εικόνα 25 Εφαρμογή του πίνακα Μετατόπισης [41]

B. Περιστροφή/Rotate

Με αυτήν τη λειτουργία μπορούμε να περιστρέψουμε ένα σημείο από το σημείο προσδιορισμού του συστήματος ως προς κάποια κατεύθυνση. Έτσι, έχοντας ένα σημείο $[x \ y \ z]$ σαν διάνυσμα στήλης $\mathbf{v}$, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τον πίνακα R με αυτό το $\mathbf{v}$ και να προκύψει το διάνυσμα $\mathbf{v}'$ που είναι το νέο σημείο περιστρεφόμενο κατά γωνία α στον x άξονα, β γωνία στον y άξονα και γ γωνία στον z άξονα.

$$R = R_z(\alpha) R_y(\beta) R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\text{yaw}} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}^{\text{pitch}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}^{\text{roll}}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}$$

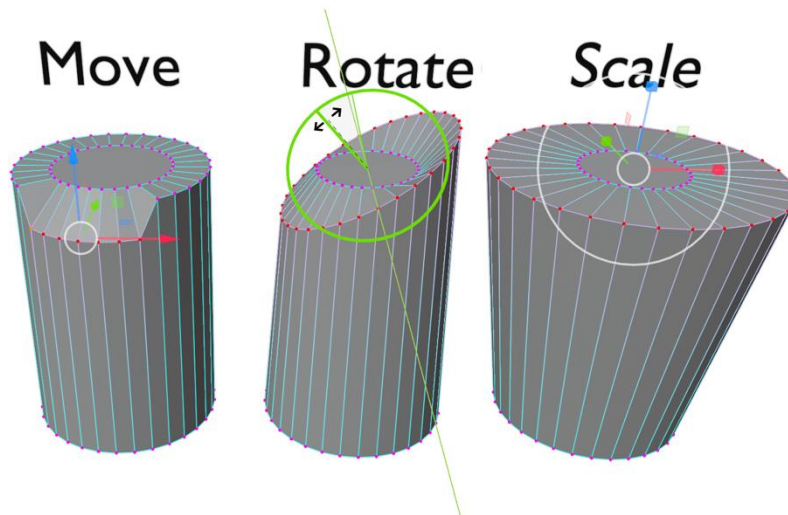
Εικόνα 26 Εφαρμογή του πίνακα περιστροφής [42]

C. Κλιμάκωση/Scale

Με την κλιμάκωση μπορούμε να μεγεθύνουμε (με παράμετρο > 1) ή να σμικρύνουμε (με παράμετρο < 1) ένα μοντέλο, κλιμακώνοντας το κάθε σημείο ξεχωριστά προς κάποια κατεύθυνση ως προς το σημείο προσδιορισμού του συστήματος. Έτσι, αν έχουμε το κάθε σημείο ως $\mathbf{v}(v_x, v_y, v_z)$ και u_x, u_y, u_z την παράμετρο κλιμάκωσης στον κάθε άξονα xyz αντίστοιχα, το $S_u \mathbf{p}$ θα μας δώσει το νέο μοντέλο κλιμακούμενο. Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας μεταμόρφωσης S .

$$S_v p = \begin{bmatrix} v_x & 0 & 0 \\ 0 & v_y & 0 \\ 0 & 0 & v_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x p_x \\ v_y p_y \\ v_z p_z \end{bmatrix}$$

Εικόνα 27 Εφαρμογή του πίνακα κλιμάκωσης [43]



Εικόνα 28 Παραδείγματα των λειτουργιών Move, Rotate, Scale στο λογισμικό Blender.

4.2.2 Πρόσθεση σημείων

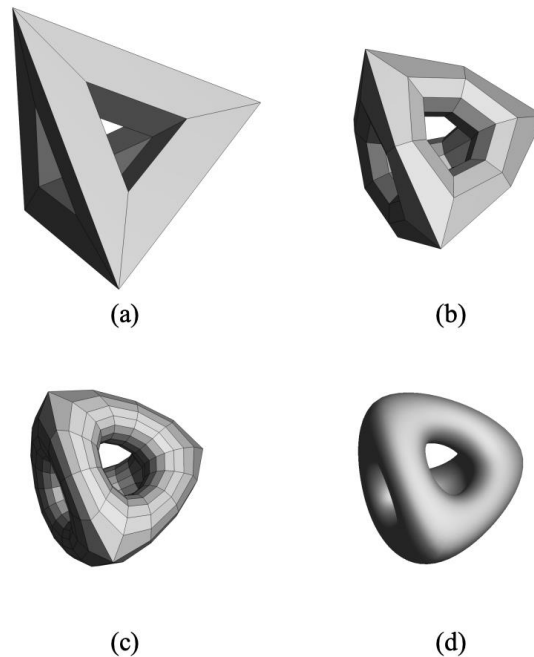
Σε περιπτώσεις που τα ήδη υπάρχοντα σημεία ενός μοντέλου δεν επαρκούν για να σχηματιστούν στην επιθυμητή μορφή, ο σχεδιαστής αναλαμβάνει να προσθέσει περισσότερα σημεία.

Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι για να αυξηθεί ο αριθμός των σημείων.

1. Με τη χρήση του αλγορίθμου Υποδιαίρεσης Επιφάνειας (Subdivision Surface)
Ο αλγόριθμος υποδιαίρεσης επιφάνειας έχει αναδρομικό χαρακτήρα. Η διαδικασία ξεκινά με ένα πολυγωνικό πλέγμα βασικού επιπέδου (λίγες λεπτομέρειες). Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένα σχέδιο βελτίωσης σε αυτό το πλέγμα. Αυτή η διαδικασία παίρνει αυτό το πλέγμα και το υποδιαιρεί, δημιουργώντας νέες κορυφές και νέες όψεις. Οι θέσεις των νέων κορυφών στο πλέγμα υπολογίζονται με βάση τις θέσεις των κοντινών παλαιών (πλέγμα βασικού επιπέδου) κορυφών, ακμών και/ή όψεων. Σε πολλά σχήματα βελτίωσης, οι θέσεις των παλαιών κορυφών αλλάζουν επίσης (πιθανώς με βάση τις θέσεις των νέων

κορυφών). Αυτή η διαδικασία παράγει ένα πιο πυκνό πλέγμα από το αρχικό, που περιέχει περισσότερες πολυγωνικές όψεις (συνήν με συντελεστή 4). Αυτό το παραχθέν πλέγμα μπορεί να περάσει από το ίδιο σχήμα τελειοποίησης ξανά και ξανά για να παράγει όλο και περισσότερα εκλεπτυσμένα πλέγματα. Κάθε επανάληψη ονομάζεται επίπεδο υποδιαίρεσης, ξεκινώντας από το μηδέν (πριν συμβεί οποιαδήποτε βελτίωση). Η οριακή επιφάνεια υποδιαίρεσης (limit surface) είναι η επιφάνεια που παράγεται από αυτή τη διαδικασία που εφαρμόζεται επαναληπτικά άπειρες φορές. Στην πρακτική χρήση, ωστόσο, αυτός ο αλγόριθμος εφαρμόζεται μόνο λίγες φορές (≤ 5) [44].

Επομένως ο αλγόριθμος είναι πολύ χρήσιμος αφού έχουμε φτιάξει μια αρκετά μακρινή και απλή προσέγγιση ενός μοντέλου που θέλουμε να προσθέσουμε εύκολα γεωμετρία για να το προσεγγίσουμε καλύτερα χωρίς πολύ κόπο εκ μέρους μας. Η πρόσθεση γεωμετρίας έχει ελεγχόμενο αριθμό τετραγώνων καθώς συνήθως τετραπλασιάζει τις πλευρές (faces) του μοντέλου μας χωρίς να χαλάει τη ροή των πολυγώνων.



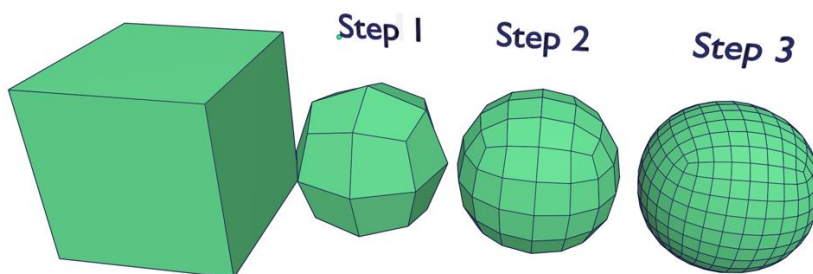
Εικόνα 29 Αναδρομική υποδιαίρεση μιας επιφάνειας.(a) Πλέγμα βασικού επιπέδου. (b)Μετά από 1 επίπεδο υποδιαίρεσης. (c) Μετά από 2 επίπεδα υποδιαίρεσης.(d) Οριακή επιφάνεια (υποδιαίρεση άπειρων επιπέδων) [45].

Μια από τις πιο διαδεδομένες υλοποιήσεις είναι αυτή που προτάθηκε από τους E. Catmull και J. Clark το 1978 [46] και είναι μια γενίκευση των ομοιόμορφων καμπυλών C^2 -cubic B-spline. Για κανονικά πλέγματα ελέγχου, ο αλγόριθμος υποδιαίρεσης Catmull-Clark δημιουργεί ομοιόμορφες επιφάνειες κυβικών B-spline. Για ακανόνιστα κλειστά πολυγωνικά πλέγματα αυθαίρετης τοπολογίας ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής:

1. Υπολόγισε το κέντρο κάθε όψης (δηλαδή το average των κορυφών που την αποτελούν).
2. Υπολόγισε το κέντρο κάθε ακμής (δηλαδή το σημείο τομής των δύο κορυφών που την αποτελούν με τα δύο κέντρα από τις όψεις που μοιράζονται την ακμή).
3. Υπολόγισε το v^1 για κάθε κορυφή ως εξής:

$$v^1 = \frac{1}{n}Q + \frac{2}{n}R + \frac{(n-3)}{n}v$$

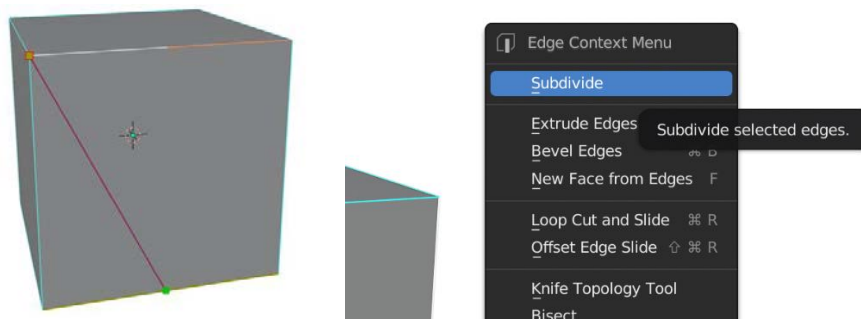
Όπου Q είναι το μέσο άθροισμα όλων των όψεων που περικυκλώνουν την κορυφή v, R είναι το μέσο άθροισμα όλων των ακμών με άκρο v, και n είναι ο βαθμός του v.



Εικόνα 30 Αριστερά έχουμε έναν απλό κύβο, και δεξιά εφαρμόζουμε διαδοχικά βήματα 1,2,3 του αλγορίθμου Catmull-Clark στο λογισμικό Blender.

2. Με το εργαλείο Υποδιαίρεσης Ακμής ή Πλευράς του blender

Σε περιπτώσεις που δεν είναι επιθυμητό να υποδιαιρεθεί ολόκληρο το μοντέλο, το εργαλείο Knife του blender είναι αρκετά βοηθητικό. Με αυτό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει μια τομή ανάμεσα σε δύο κορυφές ή μέσα σε μια πλευρά. Επίσης, μπορεί να υποδιαιρέσει ξεχωριστά μια ακμή σε δύο ακμές ίσου μήκους με τη λειτουργία Subdivide Edge.



Εικόνα 31 Εργαλείο Knife (αριστερά). Subdivide Edge (δεξιά) στο λογισμικό Blender.

4.2.3 Ομαλοποίηση ενός πλέγματος

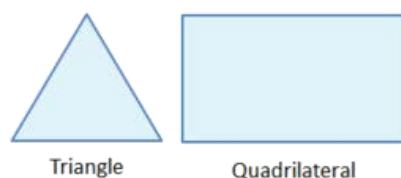
Η εξομάλυνση είναι μια από τις βασικές διαδικασίες για τη βελτίωση της ποιότητας του πλέγματος.

Στο άρθρο που δημοσίευσαν οι Sun et al. (2015) [47], αναπτύσσεται μια νέα και αποτελεσματική προσέγγιση εξομάλυνσης για επίπεδα και επιφανειακά πλέγματα με βάση τη γεωμετρική παραμόρφωση στοιχείων.

Η προσέγγιση που παρουσιάζεται περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια.

1. Το πρώτο στάδιο είναι η γεωμετρική παραμόρφωση όλων των επιμέρους στοιχείων μέσω μιας ειδικά σχεδιασμένης λειτουργίας (operation) τάνυσης (stretching)-συρρίκνωσης (shrinking) δύο βημάτων (Stretching Shrinking Operation-SSO), η οποία εκτελείται μετακινώντας τις κορυφές κάθε στοιχείου σύμφωνα με έναν συγκεκριμένο κανόνα, προκειμένου να αποκτηθεί ένα καλύτερο σχήμα του στοιχείου.
2. Το δεύτερο στάδιο είναι ο προσδιορισμός της θέσης κάθε κόμβου του πλέγματος με μια σταθμισμένη μέση στρατηγική σύμφωνα με τις ποιοτικές αλλαγές των παρακείμενων στοιχείων του.

Ο εν λόγω αλγόριθμος εξομάλυνσης που βασίζεται σε SSO λειτουργεί αποτελεσματικά για τριγωνικό πλέγμα και μπορεί φυσικά να επεκταθεί σε τετραγωνικό πλέγμα (quadrilateral), αυθαίρετο πολυγωνικό πλέγμα και μικτό πλέγμα.

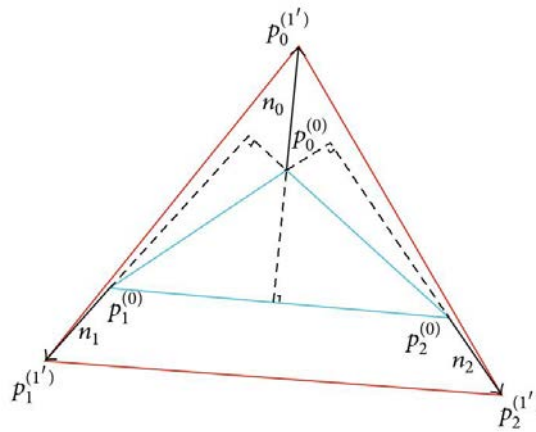


Εικόνα 32 Τριγωνικό και Τετραγωνικό πλέγμα [48].

Όσον αφορά τον αλγόριθμο στο πρώτο στάδιο, η γεωμετρική παραμόρφωση κάθε μεμονωμένου τριγώνου μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο πράξεις, τέντωμα και συρρίκνωση. Η λειτουργία τεντώματος θα μεγεθύνει το μέγεθος του αρχικού τριγώνου αλλά θα αλλάξει το στοιχείο σε κανονικό σχήμα (regular shape). Για να διατηρηθεί το αρχικό του μέγεθος, πρέπει να εφαρμοστεί μια διαδικασία κλιμάκωσης ή συρρίκνωσης στο διευρυμένο τρίγωνο με καλύτερο σχήμα. Οι λεπτομέρειες του SSO δίνονται ως εξής. Για ένα αριστερόστροφα προσανατολισμένο τρίγωνο με ασύνδετες κορυφές κατά ζεύγη

$$p_i^{(0)} = [x_i^{(0)}, y_i^{(0)}]^T, i \in \{0,1,2\}.$$

Η λειτουργία τεντώματος εκτελείται τραβώντας κάθε κορυφή $p_i^{(0)}$ προς τα έξω κατά μήκος της κάθετης κατεύθυνσης n_i του απέναντι άκρου της.



Εικόνα 33 «Τέντωμα» των κορυφών ενός τριγώνου [47].

Τότε παίρνουμε ένα μεγεθυμένο νέο τρίγωνο με νέες κορυφές να υπολογίζονται με τον τύπο

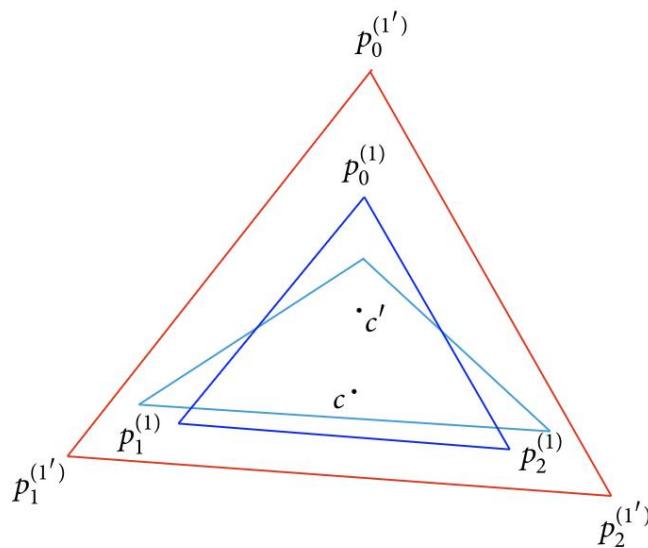
$$p_i^{(1')} = p_i^{(0)} + \lambda n_i, i = 0,1,2$$

όπου λ μπορεί διαισθητικά να γίνει κατανοητό ως παράγοντας τάνυσης για τον έλεγχο του βαθμού γεωμετρικής τάνυσης. Μεγάλες τιμές του λ σημαίνει πιο σημαντική βελτίωση για το σχήμα ή την ποιότητα του στοιχείου. Υπάρχουν πολλές επιλογές για να ορισθεί η παράμετρος λ . Η ακόλουθη έκφραση όσον αφορά το μέσο μήκος l του αρχικού στοιχείου και τη μέτρηση ποιότητας $q, (q \in [0,1])$, q παίρνει την τιμή 1 για το κανονικό στοιχείο και 0 για το εκφυλισμένο στοιχείο υιοθετείται για να αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι απαιτείται μόνο μικρό τέντωμα όταν το στοιχείο πλησιάζει σε κανονικό σχήμα (q πλησιάζει το 1):

$$\lambda = (1 - q)l$$

Η μέτρηση ποιότητας q για το τρίγωνο μπορεί να ληφθεί ως $2r/R$, όπου r και R αντιπροσωπεύουν την ακτίνα του εγγεγραμμένου κύκλου (incircle) και του περιγεγραμμένου κύκλου του τριγώνου (circumcircle), αντίστοιχα.

Μετά την ολοκλήρωση της λειτουργίας τάνυσης, το σχήμα ή η ποιότητα του αρχικού τριγώνου μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά. Αυτή η διαδικασία, ωστόσο, συνήθως θα μεγεθύνει το μέγεθος του αρχικού τριγώνου. Για να διατηρηθεί το αρχικό του μέγεθος, πρέπει να εφαρμοστεί μια λειτουργία κλιμάκωσης ή συρρίκνωσης που φαίνεται στην επόμενη εικόνα στο μεγεθυμένο τρίγωνο με καλύτερο σχήμα.



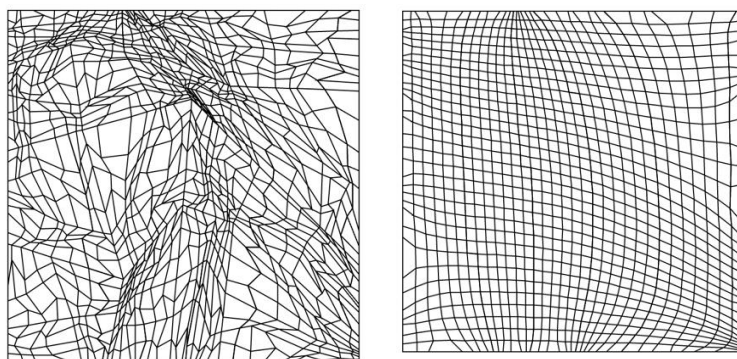
Εικόνα 34 Λειτουργία συρρίκνωσης [47].

Το νέο τρίγωνο θα έχει κορυφές με βάση τον τύπο:

$$p_i^{(1)} = c^{(0)} + k \left(p_i^{(1')} - c^{(1')} \right), i = 0, 1, 2,$$

όπου $c^{(0)} = (\sum_{i=0}^2 p_i^{(0)})/3$ και $c^{(1')} = (\sum_{i=0}^2 p_i^{(1')})/3$ αντιπροσωπεύουν το κέντρο του τριγώνου πριν και μετά την τάνυση.

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου εξομάλυνσης φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 35 Αρχικό πλέγμα δίχως καμία ομαλοποίηση (αριστερά). Τελικό ομαλό πλέγμα (δεξιά) [47].

4.3 Γλυπτική

Η ψηφιακή γλυπτική, γνωστή και ως μοντελοποίηση γλυπτών ή τρισδιάστατη γλυπτική, είναι η χρήση λογισμικού που προσφέρει εργαλεία στον καλλιτέχνη έτσι ώστε να σπρώξει (push), να τραβήξει (pull), να εξομαλύνει (smooth), να πιάσει (grab), να τσιμπήσει (pinch) ή να χειριστεί με άλλο τρόπο ένα ψηφιακό αντικείμενο σαν να ήταν φτιαγμένο από πραγματικό πηλό.

Η γλυπτική ενός αντικειμένου δίνει στον καλλιτέχνη περισσότερη ελευθερία σε σύγκριση με την πολυγωνική μοντελοποίηση αφού

1. καταργεί την προϋπόθεση να γνωρίζει ο καλλιτέχνης τον τρόπο που πρέπει να τοποθετήσει τις ακμές και τα σημεία έτσι ώστε να μην υπάρξουν οπτικά προβλήματα. Συγκεκριμένα αφαιρείται η έννοια του polygonal flow, της ροής των πολυγώνων.
2. Ο χρήστης είναι ελεύθερος να πλάσει το μοντέλο του όπως θα έπραττε σε πραγματικές συνθήκες με αληθινό πηλό. Η φαντασία και οι γνώσεις ανατομίας του είναι οι μοναδικές ικανότητες που απαιτούνται.
3. Ο καλλιτέχνης δεν ανησυχεί για τον αριθμό των σημείων που προστίθενται. Στην πολυγωνική μοντελοποίηση, μια αύξηση του αριθμού σημείων αυτομάτως συνεπάγεται και επιπρόσθετη εργασία διόρθωσης των νέων σημείων.

4.3.1 Είδη ψηφιακής γλυπτικής

Η γεωμετρία που χρησιμοποιείται σε λογισμικά ψηφιακής γλυπτικής για την αναπαράσταση του μοντέλου χωρίζεται σε δύο είδη, το καθένα προσφέροντας διαφορετικά οφέλη και περιορισμούς.

1. Γεωμετρία με βάση το πλέγμα (mesh-based)
2. Γεωμετρία με βάση σε voxels (τρισδιάστατοι κύβοι σταθερού όγκου)

Η πλειονότητα των εργαλείων ψηφιακής γλυπτικής στην αγορά χρησιμοποιεί γεωμετρία με βάση το πλέγμα, στην οποία ένα αντικείμενο αντιπροσωπεύεται από ένα διασυνδεδεμένο επιφανειακό πλέγμα πολυγώνων που οι κορυφές του δύναται να μετασχηματιστούν με τις κατάλληλες βούρτσες. Η Πολυγωνική γλυπτική είναι η πιο παλιά και πιο διαδεδομένη τεχνική. Χρησιμοποιείται για μοντέλα τόσο οργανικής φύσεως όσο και σκληρών επιφανειών. Άλλα εργαλεία ψηφιακής γλυπτικής χρησιμοποιούν γεωμετρία βασισμένη σε voxels όπου αυτοί οι κύβοι σταθερού όγκου μπορούν να προστεθούν και να αφαιρεθούν, όπως η γλυπτική σε πραγματικό πηλό. Άλλα εργαλεία χρησιμοποιούν περισσότερες από μία βασικές αναπαραστάσεις γεωμετρίας. Ένα πλεονέκτημα των προγραμμάτων που βασίζονται σε πλέγμα είναι ότι υποστηρίζουν γλυπτική σε πολλαπλές αναλύσεις σε ένα μόνο μοντέλο. Οι περιοχές του μοντέλου που είναι λεπτομερείς μπορεί να έχουν πολύ μικρά πολύγωνα ενώ άλλες περιοχές μπορεί να έχουν μεγαλύτερα πολύγωνα (Dynamic Topology-Tessellation). Σε πολλά λογισμικά που βασίζονται σε πλέγμα, το πλέγμα μπορεί να επεξεργαστεί σε διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας και οι αλλαγές σε ένα επίπεδο θα μεταδοθούν σε υψηλότερα και χαμηλότερα επίπεδα λεπτομέρειας μοντέλου (Multiresolution Sculpting). Σημαντικός περιορισμός της γλυπτικής πλέγματος είναι η σταθερή τοπολογία του. Η συγκεκριμένη διάταξη των πολυγώνων μπορεί να περιορίσει τους τρόπους με τους οποίους μπορούν να προστεθούν ή να επεξεργαστούν λεπτομέρειες. Ένα πλεονέκτημα της γλυπτικής με voxels είναι ότι τα voxels επιτρέπουν πλήρη ελευθερία στην προσθαφαίρεση γεωμετρίας. Η τοπολογία ενός μοντέλου μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς κατά τη διαδικασία γλυπτικής καθώς προστίθεται και αφαιρείται υλικό, κάτι που απαλλάσσει τον γλύπτη από το να εξετάσει τη διάταξη των πολυγώνων στην επιφάνεια του μοντέλου. Τα voxels, ωστόσο, είναι πιο περιορισμένα στον χειρισμό πολλαπλών επιπέδων λεπτομέρειας και είναι πιο απαιτητικά σε πόρους μνήμης RAM και επεξεργαστή ενός υπολογιστή [49].

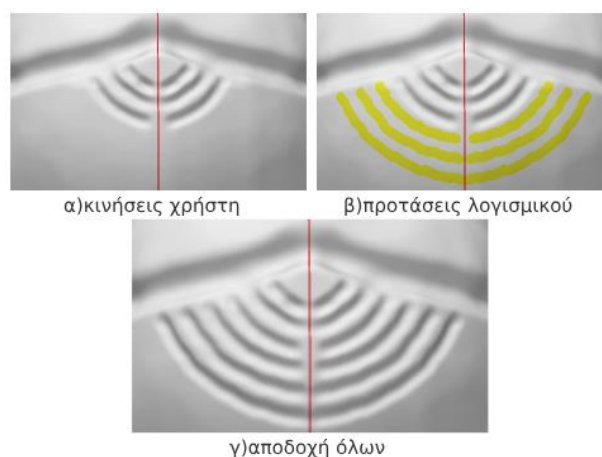
Ένα voxel είναι ένα τρισδιάστατο (3D) pixel (VOLumetric-piXEL). Χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές σχεδίασης αλλά και σε ιατρικές απεικονίσεις για να αναπαραστήσει ένα στοιχείο όγκου. Ακριβώς όπως ένα pixel αντιπροσωπεύει ένα σημείο σε ένα δισδιάστατο πλέγμα, ένα voxel αντιπροσωπεύει ένα σημείο σε ένα τρισδιάστατο πλέγμα. Οι αναπαραστάσεις που βασίζονται σε voxel χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς όπως η τρισδιάστατη μοντελοποίηση, οι επιστημονικές προσομοιώσεις, η ιατρική απεικόνιση (όπως αξονικές τομογραφίες και μαγνητική τομογραφία). Κάθε voxel μπορεί να αποθηκεύσει πληροφορίες όπως χρώμα, πυκνότητα, διαφάνεια ή οποιοδήποτε άλλο χαρακτηριστικό ανάλογα με την εφαρμογή. Επειδή είναι μια μέθοδος με μεγάλο όγκο πληροφορίας, δεν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως τα βιντεοπαιχνίδια. Για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιούνται τα πολύγωνα και για την δημιουργία αυτών, η πολυγωνική γλυπτική.

Η ψηφιακή γλυπτική συχνά περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες κινήσεις μεγάλων, επικαλυπτόμενων παραμορφώσεων που παρεμβάλλονται με μικρές, λεπτομερείς πινελιές. Μια τέτοια σωρευτική διαδικασία μπορεί να απαιτεί σημαντική τεχνογνωσία και αρκετές προσπάθειες με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα αποθαρρυντική για αρχάριους χρήστες.

Οι ερευνητές Mengqi Peng et al. (2018) [50] ανέπτυξαν ένα λογισμικό τρισδιάστατης γλυπτικής που βοηθά τους επαγγελματίες σχεδιαστές, αλλά κυρίως τους αρχάριους, να δημιουργήσουν μοντέλα με μειωμένη χειρωνακτική εργασία, χρόνο αλλά και βελτιωμένη ποιότητα στο τελικό αποτέλεσμα. Το εν λόγω σύστημα καταγράφει και αναλύει τις κινήσεις του χρήστη συμπεριλαμβανομένων των πινελιών (brush strokes) και κινήσεις της κάμερας και προβλέπει τι μπορεί να κάνουν στο μέλλον. Με βάση αυτά τα στοιχεία προτείνει αλλαγές και εναποθέτει στον χρήστη να αποδεχτεί πλήρως, να αποδεχτεί εν μέρει ή να αγνοήσει τις προτάσεις και έτσι να διατηρήσει πλήρως τον έλεγχο και το ατομικό στυλ. Μπορούν επίσης να επιλέξουν ρητά και να κλωνοποιήσουν το παρελθόν (να επαναλάβουν προηγούμενες κινήσεις και πινελιές) σε περιοχές του μοντέλου (επαναληψιμότητα).

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι προηγούμενες κινήσεις του χρήστη καθώς και τις προτάσεις του λογισμικού. Παρατηρούμε πως οι προτάσεις είναι χρήσιμες για τον χρήστη εάν θέλει να συνεχίσει τις κινήσεις του στο ήδη υπάρχον μοτίβο. Με την αποδοχή αυτών των προτάσεων, το τελικό αποτέλεσμα δεν διαφέρει οπτικά από τις χειροκίνητες κινήσεις

του χρήστη γλιτώνοντας στον χρήστη χρόνο και κόπο. Επίσης, του δίνει μια αίσθηση ότι το πρόγραμμα τον καταλαβαίνει κάνοντάς τον να αισθάνεται οικεία συνεχίζοντας σε επόμενες κινήσεις.



Εικόνα 36. α)Κινήσεις χρήστη, β) προτάσεις λογισμικού με βάση τις κινήσεις, γ) αποδοχή όλων των προτάσεων [50] .

Κύριο μειονέκτημα της ψηφιακής γλυπτικής για σχεδίαση αντικειμένου το οποίο προορίζεται για εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως τα βιντεοπαιχνίδια ή παρόμοιου τύπου είναι η αναγκαία μείωση των κορυφών του τελικού αποτελέσματος συγκριτικά με την αρχική μορφή του σχήματος. Αυτό συμβαίνει διότι το μέγεθος του συνόλου των κορυφών του μοντέλου είναι εξαιρετικά μεγάλο για να το επεξεργάζεται μια κοινή κάρτα γραφικών ενός μέσου χρήστη σε κάθε καρέ ανανέωσης της οθόνης.

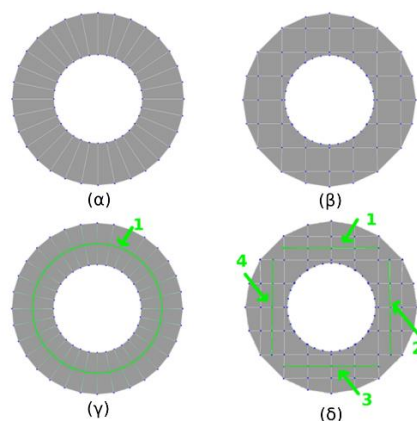
Η τεχνική που εφαρμόζεται για να ξεπεράσει αυτό το πρόβλημα ονομάζεται Remeshing και αφορά τον επαναπροσδιορισμό του πλέγματος του μοντέλου με λιγότερες κορυφές, παρόμοια μορφή σχήματος και βέλτιστη ροή πολυγώνων εάν προορίζεται για σκελετική κίνηση (skeletal animation).

4.4 Remesh

Πολυγωνικά πλέγματα που δημιουργούνται σε κάποιο ενδιάμεσο στάδιο μιας βιομηχανικής διαδικασίας CAD ή σε κάποια εφαρμογή ψηφιακής γλυπτικής έχουν συχνά κακή ποιότητα. Τα εκφυλισμένα τρίγωνα, δηλαδή τα τρίγωνα που περιέχονται σε μια γραμμή και έχουν μηδενικό εμβαδόν, και οι τοπολογικές ασυνέπειες καθιστούν δύσκολη τη χρήση τέτοιων μοντέλων σε οποιαδήποτε μεταγενέστερη εφαρμογή όπως τα

βιντεοπαιχνίδια. Για να γίνουν αυτά τα δεδομένα προσβάσιμα σε άλλες εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου οι απαιτήσεις είναι αυξημένες και οι πόροι χρησιμοποιούνται στο βέλτιστο σε σχέση με την απόδοση της μνήμης RAM και της επεξεργαστικής ισχύς, τα μοντέλα πρέπει να μετατραπούν σε βελτιωμένες εκδόσεις χωρίς να μεταβάλλεται το συνολικό σχήμα τους. Αυτός ο νέος επαναπροσδιορισμός του υπάρχοντος πλέγματος συνήθως ονομάζεται *remeshing*, ή αλλιώς τεχνική επαναπροσδιορισμού πλέγματος [51]. Ο όρος *remesh*, στον χώρο του ψηφιακού τρισδιάστατου χώρου, αναφέρεται στην επαναδημιουργία του πλέγματος ενός αντικειμένου χωρίς να χαθεί η σιλουέτα του. Πλέγμα θεωρείται το σύνολο που αποτελείται από τα στοιχεία που αποτελούν το αντικείμενο δηλαδή τα σημεία (*vertices*), τις ακμές (*edges*) καθώς και τις προσόψεις (*faces*) που σχηματίζονται από τις ενώσεις μεταξύ σημείων και κορυφών. Δύο είναι συνήθως οι λόγοι για τους οποίους χρειάζεται να γίνει επαναδημιουργία του πλέγματος.

1. Όταν πρέπει να μειωθεί ο αριθμός των σημείων (*vertices*) ενός τρισδιάστατου μοντέλου επειδή δεν μπορεί να επεξεργαστεί ο υπολογιστής μεγάλο αριθμό σημείων κάθε δευτερόλεπτο.
2. Όταν το μοντέλο πρέπει να έχει διαφορετική ροή των ακμών και των σημείων έτσι ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, ένας κύκλος με τοπολογία όπως της εικόνας (α) είναι πιο εύκολα μεταχειρίσιμος και μπορούν να προστεθούν νέες ακμές (όπως αυτές με πράσινο χρώμα στην παρακάτω εικόνα (γ)) με περισσότερη ευκολία από ότι στην εικόνα (β) (όπου χρειάζονται 4 ενέργειες του χρήστη, εικόνα (δ)). Η Εικόνα (γ) συχνά αναφέρεται ως γεωμετρία με καλή ροή (*geometry with good flow*).



Εικόνα 37 Ροή πολυγώνων μέσω του λογισμικού Blender.

4.4.1 Πού εφαρμόζεται συνήθως

Εφαρμόζεται σε οργανικά μοντέλα όπου θέλουμε να μειώσουμε τον αριθμό των σημείων χωρίς να χάσουμε τη μορφή/σιλουέτα του μοντέλου έτσι ώστε να δουλέψουμε πάνω σε αυτό χωρίς καθυστερήσεις του υπολογιστή λόγω μεγάλου όγκου δεδομένων, καθώς και σε δημιουργία πολλών εκδόσεων ενός μοντέλου με κλιμακωτό αριθμό σημείων. Για παράδειγμα, για ένα τοπίο με βουνό, το μοντέλο του βουνού θα μπορούσε να ήταν ένα μοντέλο πολλών vertices για να είναι λεπτομερές σε κοντινές λήψεις της κάμερας, ένα μοντέλο με τα μισά vertices για λίγο μακρινότερες αποστάσεις, καθώς το μάτι μας δεν θα δει τις μικρές λεπτομέρειες, το χώμα και τις πέτρες, κι ένα μοντέλο με ελάχιστα vertices, τόσα ώστε να κρατηθεί η γενική σιλουέτα του βουνού όταν θα το δείχνει η κάμερα από πολύ μακριά.

Συνήθως στα βιντεοπαιχνίδια υπάρχουν 3 επίπεδα λεπτομέρειας (LOD – level of detail) για κάθε αντικείμενο που έχει πολλές λεπτομέρειες.

Παρακάτω παρουσιάζονται ένα μοντέλο με αρκετή λεπτομέρεια που παρήχθη με την τεχνική του sculpting και το αποτέλεσμα μετά από την εφαρμογή της τεχνικής remesh από το γνωστό παιχνίδι Assassin's Creed III. Παρατηρούμε πως οι γραμμές και τα σχήματα στην δεύτερη εικόνα είναι πιο ευδιάκριτα, με το πλεονέκτημα ότι ο σχεδιαστής κατανοεί και εργάζεται πάνω στο μοντέλο πιο εύκολα στο εξής προχωρώντας σε νέες αλλαγές στο μοντέλο, αλλά παράλληλα, κρατώντας τις προηγούμενες λεπτομέρειες που δημιουργήθηκαν από το sculpted μοντέλο.



Εικόνα 38 Sculpted μοντέλο από το παιχνίδι Assassin's Creed III μέσω του λογισμικού Blender.



Εικόνα 39 Remeshed μοντέλο από το παιχνίδι Assassin's Creed III μέσω του λογισμικού Blender..

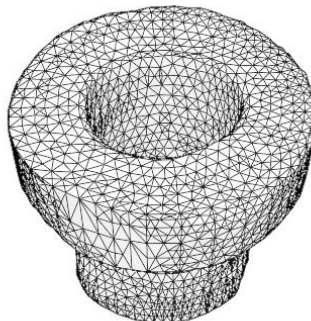
4.4.2 Τεχνικές/αλγόριθμοι remeshing

VoxelRemesh

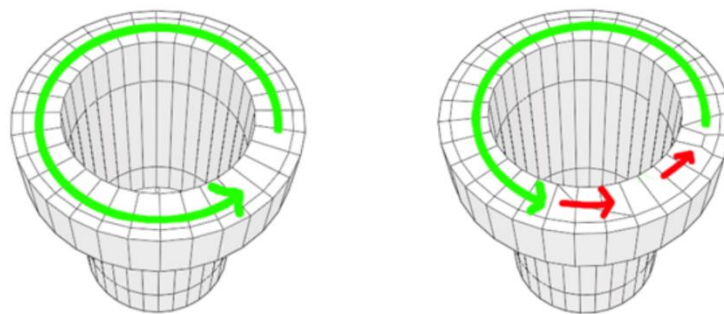
Ο αλγόριθμος Voxel Remesh που υλοποιεί το πρόγραμμα Blender χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη OpenVDB, γραμμένη σε C++ από τη DreamWorks Animation, για να δημιουργήσει εκ νέου τη γεωμετρία του μοντέλου.

Η γενική ιδέα του remeshing είναι ότι το τροποποιημένο μοντέλο που θα προκύψει θα αποτελείται μόνο από τετράγωνα (quads) και θα έχει γεωμετρία με καλή ροή (good topology flow) γύρω από κυκλικές επιφάνειες όπως τα μάτια ή οι κύλινδροι, στοιχείο σημαντικό για μοντέλα που θα έχουν κίνηση και θα παραμορφώνονται, όπως ανθρώπινα μοντέλα.

Παρακάτω φαίνεται ένα κυλινδρικού τύπου μοντέλο με μεγάλο αριθμό πολυγώνων και στη συνέχεια το remeshed - τροποποιημένο μοντέλο με καλή και κακή ροή των ακμών (edge flow).

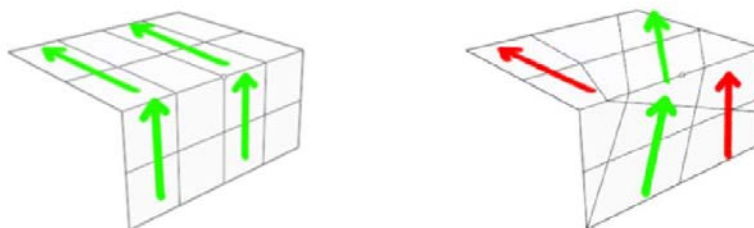


Εικόνα 40 Αρχικό μοντέλο υψηλού αριθμού κορυφών και ακμών μέσω του λογισμικού Blender.



Εικόνα 41 Κυλινδρική επιφάνεια με καλή ροή γεωμετρίας (αριστερά) και κακή (δεξιά) μέσω του λογισμικού Blender.

Ο όρος της καλής ροής των ακμών περιγράφει ομοιόμορφα κατανεμημένα, με παρόμοιο εμβαδό, τετράγωνα που ακολουθούν την καμπύλη του μοντέλου. Παρακάτω απεικονίζεται ένα απλό σχήμα με καλή ροή ακμών (αριστερά) και κακή (δεξιά). Με πράσινα βέλη απεικονίζονται τα σύνολα ακμών που δημιουργούν την καλή ροή, ενώ με κόκκινο αυτά που διακόπτουν την ροή και την καθιστούν κακή.



Εικόνα 42 Επίπεδη επιφάνεια με καλή ροή γεωμετρίας (αριστερά) και κακή (δεξιά) μέσω του λογισμικού Blender.

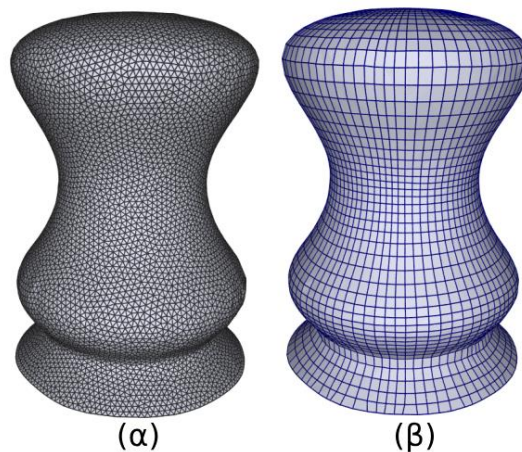
QuadRemesh

Οι Yu-Kun Lai et al. (2008) [52] παρουσίασαν έναν νέο αλγόριθμο γνωστό ως QuadRemesh που μετατρέπει ένα αδόμητο πλέγμα που αποτελείται από τρίγωνα σε ένα πλέγμα τετραγωνικών όψεων στην πλειονότητα, με ακμές ευθυγραμμισμένες με τις κατευθύνσεις της αρχικής γενικής τοπολογίας και τις καμπυλότητες της επιφάνειας.

Δεδομένου ενός αδόμητου τριγωνικού πλέγματος M ως είσοδο, υπολογίζεται ένα πεδίο εφαπτομένης κατεύθυνσης για να ευθυγραμμιστούν οι τετραγωνικές όψεις. Εκτελείται μια ισοτροπική αναδόμηση $M \rightarrow M'$ όπου η τοπική πυκνότητα κορυφών προσαρμόζεται

στη μέγιστη καμπυλότητα της επιφάνειας. Η βασική ιδέα της σταδιακής ευθυγράμμισης είναι οι κορυφές του M' να ολισθήσουν (vertex sliding) πάνω από το πλέγμα εισόδου M έτσι ώστε οι ακμές του M' να ευθυγραμμιστούν με τις κύριες κατευθύνσεις του M . Η ολίσθηση είναι ελεγχόμενη από διάφορες δυνάμεις που προάγουν την ομοιόμορφη κατανομή των κορυφών έτσι ώστε να παραχθούν τετραγωνικές όψεις με παρόμοιο εμβαδό. Τυχόν διαγώνιες που προκύπτουν αφαιρούνται από το πλέγμα M' έτσι ώστε να δημιουργείται ένα πλέγμα εξόδου τετραγωνικών όψεων ως επί το πλείστον. Για να αποφευχθούν τα εκφυλισμένα τρίγωνα, προσαρμόζεται η συνδεσιμότητα πλέγματος κατά την ολίσθηση κορυφής [52].

Παρακάτω απεικονίζεται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου QuadRemesh σε ένα μοντέλο από σκάκι.



Εικόνα 43 Παράδειγμα αποτελέσματος αλγορίθμου QuadRemesh [52].

EdgeCollapse

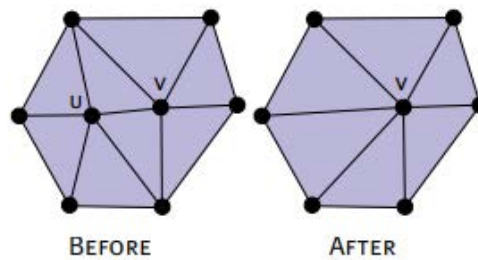
Σε περιπτώσεις που δεν είναι αναγκαίο να υπάρχει σωστή τοπολογία αλλά είναι θεμιτή η μείωση των πολυγώνων ενός πλέγματος με μεγάλο αριθμό κορυφών, χρησιμοποιείται η τεχνική της κατάρρευσης ακμής (edge collapse). Η ιδέα αυτού του αλγορίθμου είναι η εξής. Δοθέντος δύο κορυφών u και v που σχηματίζουν μια ακμή, μια από τις δύο μετακινείται προς την άλλη και καταρρέει, δηλαδή συνενώνεται με την άλλη. Για την κατάρρευση της κορυφής u ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα.

1. Αφαίρεση κάθε τριγώνου που περιέχει σαν κορυφές τα u και v .
2. Ενημέρωση των υπολειπόμενων τριγώνων που περιείχαν την κορυφή u να περιέχουν την κορυφή v αντί της u .
3. Αφαίρεση της κορυφής u .

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός κορυφών. Σε κάθε βήμα αφαιρείται συνήθως μια κορυφή, δύο όψεις και τρεις ακμές. Για να επιλεγεί η επόμενη ακμή κατάρρευσης, προτεραιότητα έχουν αυτές που προκαλούν τις μικρότερες αλλαγές στο σχήμα του μοντέλου. Σημειώνεται πως επίπεδες επιφάνειες μπορούν να αναπαρασταθούν με λίγες ακμές ενώ επιφάνειες με καμπύλες χρειάζονται περισσότερες. Με βάση αυτά τα στοιχεία υπολογίζεται μια φόρμουλα κόστους ακμής. Το κόστος κατάρρευσης μιας ακμής ορίζεται ως το μήκος της ακμής πολλαπλασιασμένο από έναν όρο καμπυλότητας.

$$cost(u, v) = ||u - v|| \times \max_{f \in T_u} \{ \min_{n \in T_{uv}} \{ (1 - f.normal \cdot n.normal) \div 2 \} \}$$

όπου T_u είναι το σύνολο των τριγώνων που περιέχουν την κορυφή u και T_{uv} είναι το σύνολο των τριγώνων που περιέχουν και τις δύο κορυφές u και v . Παρακάτω παρουσιάζεται η κατάρρευση της κορυφής u .



Εικόνα 44 Κατάρρευση κορυφής u με τη μέθοδο Edge Collapse [53]

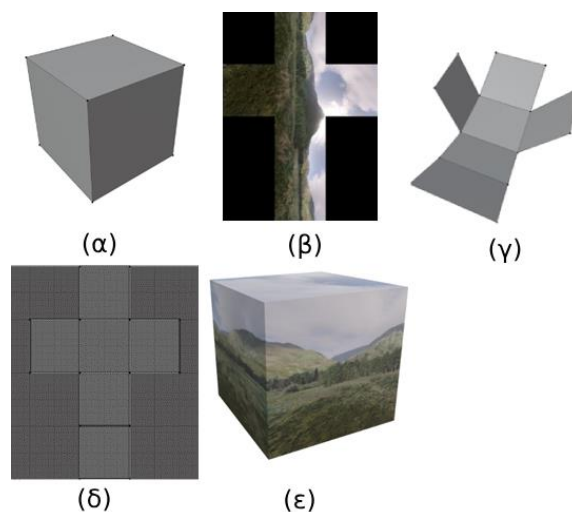
Κεφάλαιο 5 UV Texturing

Το επόμενο στάδιο της υλοποίησης ενός χαρακτήρα για βιντεοπαιχνίδια είναι η δημιουργία υλικών-υφών για τα διάφορα μέρη που τον αποτελούν όπως δέρμα, μαλλιά, ρούχα, πανοπλία κ.α. καθώς και η εύκολη εφαρμογή τους. Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιούνται συστήματα μαθηματικών συναρτήσεων, εικόνες και εμπειρική γνώση για την καλύτερη δυνατή επίτευξη πιο ρεαλιστικού αποτελέσματος.

5.1 UV Unwrapping

UV Unwrapping ονομάζεται η τεχνική που μεταφέρει ένα τρισδιάστατο μοντέλο στο σύστημα δύο συντεταγμένων u, v , στον x άξονα και στον y άξονα αντιστοίχως. Σε αυτό το βήμα χαρτογραφείται κάθε τρισδιάστατη κορυφή, ακμή και όψη σε δύο διαστάσεις. Η διαδικασία είναι παρόμοια με την συσκευασία ενός βιομηχανικού προϊόντος προτού γίνει τελικό προϊόν όπως ένα κουτί γάλακτος, ή ένα κουτί αποθήκευσης από χαρτόνι. Αρχικά, σχεδιάζεται μια επίπεδη επιφάνεια με κατάλληλες εγκοπές και διπλώσεις που αργότερα θα διπλωθούν για να δημιουργήσουν το τρισδιάστατο σχήμα. Έπειτα διπλώνεται καταλλήλως έτσι ώστε να παραχθεί το τελικό τρισδιάστατο σχήμα.

Παρακάτω απεικονίζεται ένας τρισδιάστατος κύβος (α), η εικόνα που θα εφαρμοστεί σε αυτόν (β), η χαρτογράφησή του σε uv συντεταγμένες, σε τρισδιάστατη (γ) και δισδιάστατη (δ) μορφή, και το τελικό αποτέλεσμα (ε).



Εικόνα 45 Τεχνική UV Unwrapping τρισδιάστατου αντικειμένου και εφαρμογή εικόνας πάνω στο αρχικό 3d αντικείμενο μέσω του λογισμικού Blender.

Για να ολοκληρωθεί η χαρτογράφηση του μοντέλου μας, υπάρχουν εξειδικευμένοι αλγόριθμοι που χαρτογραφούν τα μοντέλα στον δισδιάστατο χώρο προσπαθώντας να χρησιμοποιήσουν όσο το δυνατόν λιγότερο χώρο στη δισδιάστατη επιφάνεια με σκοπό να μειώσουν τον φόρτο εργασίας στην μνήμη RAM του υπολογιστή. Τοποθετούν, δηλαδή, κάθε χαρτογραφημένη επιφάνεια δίπλα στις προηγούμενες με όσο το δυνατόν μικρότερο κενό χώρο. Το μόνο βήμα, που δεν είναι αυτοματοποιημένο, είναι η επιλογή ακμών από τον χρήστη για ραφές, δηλαδή η επιλογή των ακμών που θα κοπεί το μοντέλο και θα χαρτογραφηθεί. Δεν υπάρχουν κανόνες για αυτό το βήμα, αλλά πρόκειται για εμπειρική τεχνική που μαθαίνεται με δοκιμές και λάθη (trial and error). Οι ραφές που πρέπει να κοπούν ονομάζονται seams, οι κομμένες επιφάνειες του μοντέλου ονομάζονται νησίδες (un islands) και ο χώρος που τοποθετούνται όλα αυτά αποκαλείται un χάρτης (un map). Texture UV map ή texture map ονομάζεται μια εικόνα που θα χρησιμοποιηθεί για το χρώμα ή κάποια άλλη ιδιότητα στο χαρτογραφημένο μοντέλο όπου κάθε χαρτογραφημένη κορυφή στο χώρο un θα πάρει το χρώμα του pixel στην εικόνα texture ανάλογα με τη θέση της κορυφής στην εικόνα.

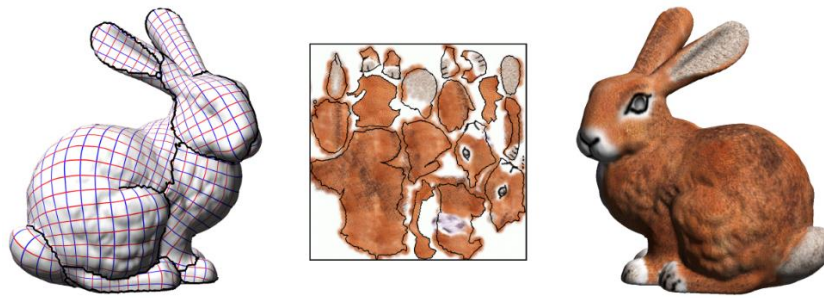
5.2 Αλγόριθμοι μετατροπής ενός 3D μοντέλου σε 2D

Δύο είναι οι συχνά χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι για την μετατροπή μοντέλων τριών διαστάσεων σε δύο και είναι οι εξής:

1. Least Squared Conformal Mapping (Σύμμορφη Χαρτογράφηση Ελαχίστων Τετραγώνων - LSCM)
2. Angle Based Flattening++ (Χαρτογράφηση με βάση των γωνιών των όψεων του μοντέλου)

5.2.1 Least Squared Conformal Mapping -LSCM

LSCM είναι μια διαδικασία αναπαράστασης τρισδιάστατων σχημάτων σε δισδιάστατα χωρίς σχετικές παραμορφώσεις. Στα μαθηματικά, conformal είναι μια συνάρτηση που διατηρεί τοπικά τις γωνίες, αλλά όχι απαραίτητα τα μήκη μεταξύ ακμών.



Εικόνα 46 Τμηματοποίηση τρισδιάστατου μοντέλου (αριστερή). Least squared conformal mapping σε δυσδιάστατη μορφή εικόνας (μεσαία). Εφαρμογή mapping της μεσαίας εικόνας στο τρισδιάστατο μοντέλο (δεξιά) [54].

Η διαδικασία χαρτογράφησης μπορεί να διασπαστεί στα ακόλουθα βήματα:

1. Τμηματοποίηση: Το μοντέλο χωρίζεται σε ένα σύνολο νησίδων υν με βάση τα seams που επιλέγει ο χρήστης.
2. Παραμετροποίηση: Κάθε νησίδα επιπεδοποιείται και τοποθετείται μαζί με τις υπόλοιπες.
3. Τοποθέτηση: Οι υν νησίδες (υν island) συγκεντρώνονται σε χώρο υφής με βάση την καλύτερη δυνατή τοποθέτησή τους με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κενού χώρου (Packing islands).

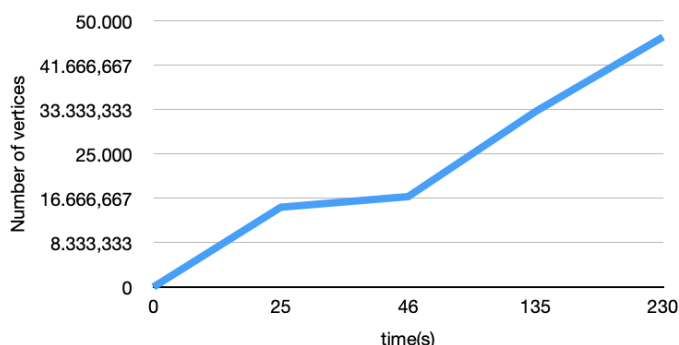
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας με ποικίλα στατιστικά εκτέλεσης του αλγορίθμου LSCM όπως ο αριθμός των κορυφών, ακμών και όψεων γνωστών μοντέλων για μέτρηση χρόνων αλγορίθμων. Επίσης, φαίνεται ο χρόνος τμηματοποίησης, παραμετροποίησης και τοποθέτησής τους.

	dinosaur	skull	bunny	horse
# vertices	14,669	16,949	34,834	48,485
# facets	14,384	15,124	69,451	96,968
# charts	43	40	23	44
segmentation time (s)	8	17	30	43
parameterization time (s)	10	23	95	190
packing ratio (rectangles)	0.48	0.51	0.43	0.37
packing ratio (our algo.)	0.55	0.55	0.6	0.58
stretch (before optim.)	2.9	2.5	1.16	1.14
stretch (after optim.)	1.26	1.55	1.14	1.12

Εικόνα 47 Στατιστικά για τον αριθμό των κορυφών, όψεων και χρόνοι εκτέλεσης (κάθετα) σε σχέση με 4 γνωστά μοντέλα benchmarking (οριζόντια) [54].

Παρακάτω βλέπουμε τον πίνακα σε μορφή συνάρτησης αριθμού των vertices προς τον χρόνο που κάνει ο αλγόριθμος Least Squared Conformal Mapping. Παρατηρούμε πως

καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κορυφών του μοντέλου, δηλαδή έχει περισσότερη λεπτομέρεια, ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου αυξάνεται γραμμικά.



Εικόνα 48 Χρόνος εκτέλεσης του LSCM σε σχέση με τον αριθμό των κορυφών μέσω του λογισμικού Blender.

Μειονεκτήματα αυτού του αλγορίθμου αποτελούν ο αργός χρόνος εκτέλεσής του και τα λάθη που προκύπτουν λόγω συσσώρευσης αριθμητικών σφαλμάτων σε μοντέλα HP [54].

5.2.2 Angle Based Flattening & ABF++

Οι Sheffer et al. (2005) [55] δημοσίευσαν την πλέον διαδεδομένη τεχνική ξεδιπλώματος τρισδιάστατων μοντέλων με όνομα Angle Based Flattening (ABF). Πρόκειται για μια τεχνική UV Layout που βασίζεται στις γωνίες μεταξύ των εδρών για να εισαχθούν οι ραφές (UV seams). Παράγει σύμμορφες παραμετροποιήσεις (conformal parameterization) που είναι αποδεδειγμένα σωστές και έχουν μικρή παραμόρφωση stretching. Ωστόσο, επειδή συσσωρεύονται αρκετά αριθμητικά λάθη, δαπανάται πολύς χρόνος και η τεχνική καθίσταται επιρρεπής σε σφάλματα για μεγάλα πλέγματα. Τη λύση φαίνεται να δίνει ο αλγόριθμος ABF++ , μια πολύ αποτελεσματική έκδοση της μεθόδου ABF που διορθώνει αυτά τα προβλήματα διατηρώντας όλα τα οφέλη του ABF. Μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα, το ABF++ παραμετροποιεί τα πλέγματα με δεκάδες χιλιάδες έως εκατομμύρια τρίγωνα. Βασίζεται σε τρεις θεμελιώδεις ιδέες:

1. μια νέα τεχνική αριθμητικής λύσης που μειώνει δραστικά τη διάσταση των γραμμικών συστημάτων που επιλύονται σε κάθε επανάληψη, επιταχύνοντας τη λύση.

2. την ανακατασκευή των 2D συντεταγμένων από τη λύση του γωνιακού χώρου που αποφεύγει τις αριθμητικές αστάθειες που εμποδίζουν το σχήμα ανακατασκευής ABF.
3. μια αποτελεσματική τεχνική ιεραρχικής λύσης. Η ιεραρχική τεχνική καθιστά δυνατή την παραμετροποίηση μοντέλων με εκατομμύρια πρόσωπα σε λίγα δευτερόλεπτα.

Σημαντικό είναι εξίσου το γεγονός πως δεν υπάρχουν ανεστραμμένα τρίγωνα (flipped normals) στην παραμετροποίηση που υπολόγισε το ABF++, αποκλείοντας περαιτέρω ενέργειες και πράξεις. Αυτές οι τροποποιήσεις καθιστούν τη μέθοδο ABF++ ιδανική για την αξιόπιστη και αποτελεσματική παραμετροποίηση μοντέλων για την επεξεργασία προβλημάτων γεωμετρίας.

5.3 Normal Maps και Normal Baking

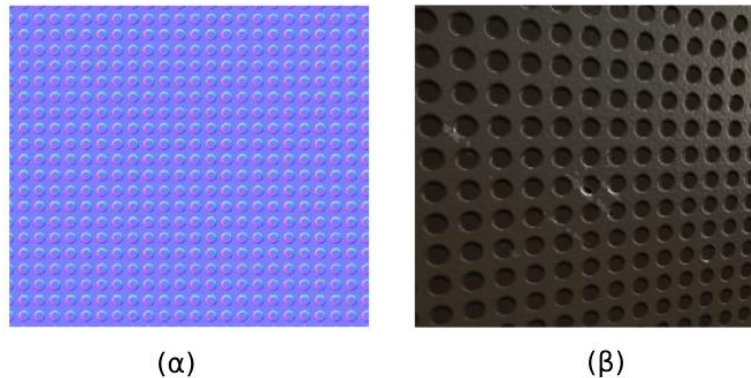
5.3.1 Normal Map

Σε εφαρμογές και παιχνίδια πραγματικού χρόνου, η μνήμη του υπολογιστή που διαθέτει ο προγραμματιστής για τα γραφικά είναι μικρή και περιορισμένη. Για τον λόγο αυτό, πρέπει να εξοικονομεί πόρους από όπου είναι δυνατόν. Στην περίπτωση των υφών-texturing ο προγραμματιστής έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει ένα μοντέλο υψηλής λεπτομέρειας (High Polygon count model - HP) με ένα χαμηλής (Low Polygon count model-LP) κρατώντας φαινομενικά τα χρώματα, τις εγκοπές και τους λοφίσκους του HP μοντέλου με τη βοήθεια των Normal Maps που προκύπτει από την τεχνική Normal Baking.

Normal map είναι ένα texture map όπου αποθηκεύει στα pixels του πληροφορία για τους άξονες x, y και z. Κάθε pixel έχει τρία κανάλια-τιμές r (κόκκινο), g (πράσινο), b (μπλε) με εύρος τιμής από 0 μέχρι 255 και κάθε τέτοιο κανάλι αντιστοιχεί στον άξονα x,y,z αντίστοιχα. Αν το pixel στην θέση u,v έχει r ίσο με 255 και 0 στα άλλα, τότε το pixel αυτό έχει πληροφορία για τον x άξονα. Παρομοίως, αν έχει στο κανάλι g τιμή ίση με 255, τότε η πληροφορία που φέρει προορίζεται για τον y άξονα και τέλος, αν η τιμή 255 είναι στον b άξονα, αναφέρεται στον z άξονα.

Με βάση αυτές τις τιμές, οι συναρτήσεις φωτισμού που θα μελετηθούν σε επόμενο κεφάλαιο υπολογίζουν τις κορυφές σαν να ήταν μετατοπισμένα κατά r, g, b στους άξονες

x , y , z αντίστοιχα. Έτσι μπορεί να δοθεί η ψευδαίσθηση πως υπάρχουν περισσότερες κορυφές προσομοιώνοντας τις εγκοπές και τους λοφίσκους με normal textures.



Εικόνα 49 Εικόνα Normal map με κωδικοποιημένες τρύπες σαν χρώματα rgb (αριστερά). Εφαρμοσμένο normal map σε επίπεδο με φωτισμό (δεξιά) μέσω του λογισμικού Blender.

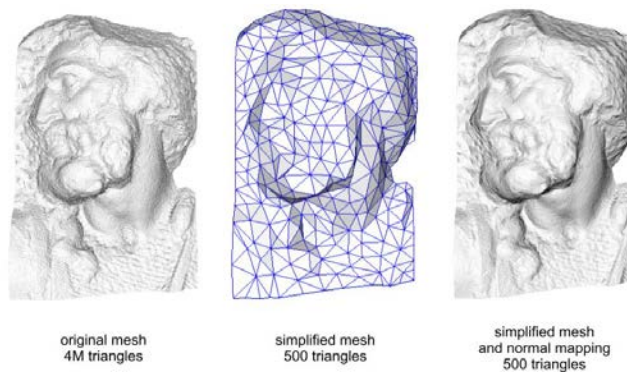
5.3.2 Normal Baking

Normal Baking ονομάζεται η τεχνική αποτύπωσης των διαφορών μεταξύ ενός HP και LP μοντέλου σε μια εικόνα texture.

Χρειάζεται ένα μοντέλο υψηλής λεπτομέρειας (με βαθουλώματα και λοφίσκους) και ένα μοντέλο χαμηλής λεπτομέρειας. Αυτά τα δύο μοντέλα πρέπει να αλληλοεπικαλύπτονται όσο πιο πολύ γίνεται έτσι ώστε ο αλγόριθμος normal baking που θα εφαρμοστεί να εντοπίσει τις διαφορές γεωμετρίας του ενός μοντέλου με του άλλου και να παράξει το τελικό χρώμα κάθε pixel του normal map.

Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα normal map που εφαρμόζει με την τεχνική του texture mapping πάνω στο μοντέλο χαμηλής λεπτομέρειας και αλληλεπιδρά με τον αλγόριθμο φωτισμού σε κάθε pixel του normal map.

Στην επόμενη εικόνα, το αριστερό στιγμιότυπο ανήκει σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο HP που αποτελείται από 4 εκατομμύρια όψεις τριγώνων. Στο μεσαίο στιγμιότυπο, απεικονίζεται το μοντέλο LP χαμηλής λεπτομέρειας με 500 όψεις τριγώνων που εφαρμόζει στο μοντέλο HP με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Δεξιά, απεικονίζεται το LP με τον φωτισμό λόγω εφαρμογής normal mapping. Για αυτόν τον λόγο ο θεατής αποκτά την ψευδαίσθηση πως πρόκειται περί HP μοντέλου.



Εικόνα 50 Παράδειγμα εφαρμογής normal map texture από μοντέλο HP σε LP [56].

5.4 Δημιουργία υφών – Texture Generation

Η διαδικαστική δημιουργία υφής είναι μια τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία υφών επιφανειών για μια ποικιλία εφαρμογών όπως παιχνίδια, σχεδίαση βιομηχανικών προϊόντων, αρχιτεκτονικό σχέδιο. Επεκτείνεται από τη σχεδίαση κάποιου αισθητικού εφέ μέχρι τη δημιουργία μιας πιο ρεαλιστικής υφής ενός ρούχου κάποιου χαρακτήρα. Άλλες εφαρμογές απαιτούν κάποια υφή που πρέπει να φαίνεται φυσική, δηλαδή χωρίς προφανή επαναλαμβανόμενα μοτίβα.

Η χειροκίνητη σχεδίαση των γεωμετριών που απαιτούνται για την επίτευξη υφών μπορεί να είναι δύσκολη και μπορεί να είναι ακόμη πιο δύσκολη η κλιμάκωση και η συμμόρφωσή τους σε σύνθετα μέρη. Η επεκτασιμότητα είναι εκεί όπου η διαδικαστική δημιουργία υφής μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τη χειροκίνητη μοντελοποίηση χαρακτηριστικών επιφάνειας. Συνδέοντας κόμβους σε ένα σύστημα γράφων και αλλάζοντας τις παραμέτρους τους, ο χρήστης μπορεί να επιτύχει κάθε είδους διαφορετικά αποτελέσματα όπως δέρμα, μέταλλο, πλαστικό, βρωμιά με μοτίβο θορύβου κλπ. Ένας κόμβος είναι ένας ήδη καθορισμένος αλγόριθμος με υποδοχές εισόδου που παράγουν συγκεκριμένα αποτελέσματα σε μια ή περισσότερες υποδοχές εξόδου.

Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι πως δίνει τη δυνατότητα στον σχεδιαστή να παράξει υφές υψηλών προδιαγραφών με αρκετή ευελιξία μέσω ενός εύκολου μεταβλητού συστήματος.

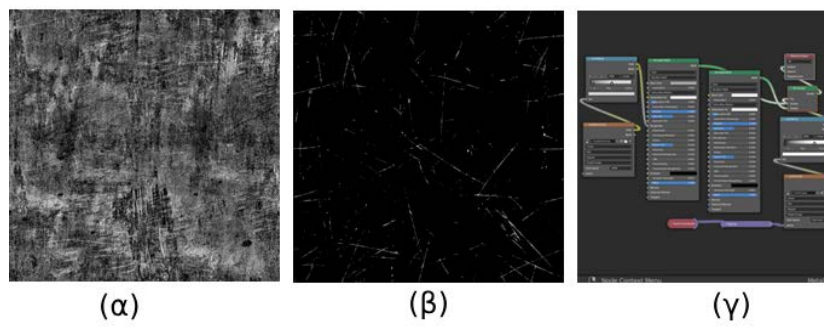
Θα δούμε τρία παραδείγματα για να κατανοήσουμε την τεχνική.

1. Μέταλλο
2. Μάρμαρο

3. Ξύλο

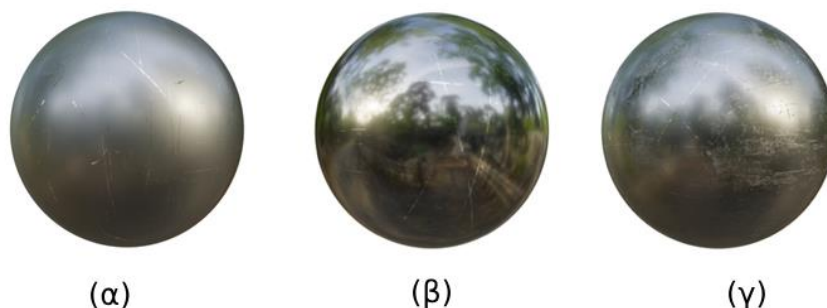
5.4.1 Μέταλλο

Η δημιουργία ενός μεταλλικού υλικού είναι πολύ απλή διότι δίνεται ως παράμετρος Metallic στον ήδη υλοποιημένο κόμβο Principled BSDF του λογισμικού Blender. Για να καταστεί πειστικό στο μάτι του θεατή όμως, ένα μεταλλικό υλικό έχει ατέλειες όπως γρατζουνιές, αποτυπώματα χεριών κτλ. Για τον λόγο αυτόν, είναι σύνηθες να προστίθενται έτοιμες υφές στα συστήματα κόμβων με τέτοιες ατέλειες, οι οποίες δημιουργούνται με κάποιο πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας όπως το Photoshop.



Εικόνα 51 Σχεδίαση μεταλλικού υλικού με τη βοήθεια υφών με γρατζουνιές και ατέλειες για περισσότερη ρεαλιστικότητα (α, β), και του συστήματος κόμβων (γ) μέσω του λογισμικού Blender.

Με αυτό το σύστημα κόμβων παράγονται τα κάτωθι αποτελέσματα με μικρές αλλαγές στις παραμέτρους του συστήματος που καθορίζουν την τελική τιμή τραχύτητας.

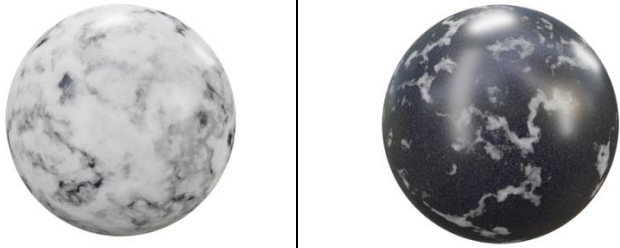
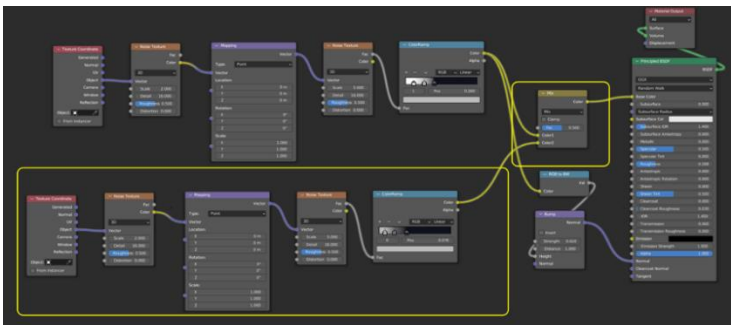


Εικόνα 52 Διαφοροποιήσεις μεταλλικού υλικού με αλλαγή παραμέτρων στο σύστημα κόμβων μέσω του λογισμικού Blender.

5.4.2 Μάρμαρο

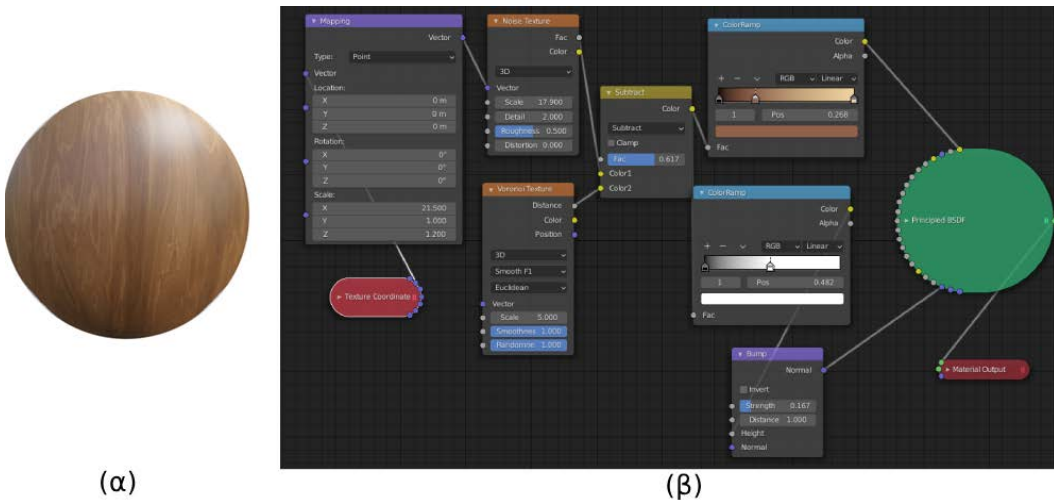
Με το κάτωθι σύστημα κόμβων, επιτυγχάνεται μια ρεαλιστική υφή μαρμάρου και η παραλλαγή της σε πιο σκούρο χρώμα και με μικρότερες λεπτομέρειες, με τη μίξη του συστήματος κόμβου με μια αντιγραφή του, παραλλαγμένο σε χρώμα και κλίμακα θορύβου.

Πίνακας 4 Δημιουργία μαρμάρινου υλικού με σύστημα κόμβων και εναλλαγή χρώματος μέσω του λογισμικού Blender.

Αποτέλεσμα αναπαράστασης υφής μαρμάρου σε μια τρισδιάστατη σφαίρα	
Σύστημα κόμβων (Με κίτρινο είναι το επιπλέον σύστημα που απαιτείται για το μαύρο μάρμαρο)	

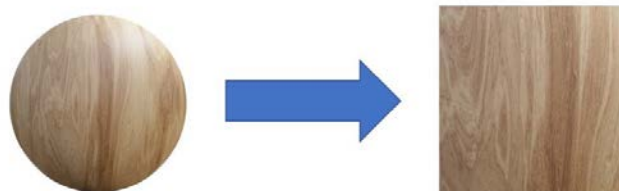
5.4.3 Ξύλο

Με το παρακάτω σύνολο κόμβων παράγεται μια υφή ξύλου. Συνδυάζοντας τους κόμβους Noise και Voronoi με το Scale x μεγαλύτερο από τα y, z στο Mapping, και περνώντας τις εξόδους τους από έναν Ramp κόμβο παράγεται το κάτωθι αποτέλεσμα.



Εικόνα 53 Υφή ξύλου σε σφαίρα (α) και Σύστημα κόμβων για τη δημιουργία υφής ξύλου (β) μέσω του λογισμικού Blender.

Σε περίπτωση που είναι αναγκαία η μετατροπή ξύλου, από υλικό σε εικόνα για να χρησιμοποιηθεί σε άλλες εφαρμογές έξω από το blender, το blender πραγματοποιεί τη μετατροπή με τη λειτουργία Bake. Με αυτήν τη λειτουργία, η υφή της σφαίρας μπορεί πολύ εύκολα να αποτυπωθεί σε έναν πίνακα από pixels, δηλαδή σε μια εικόνα texture η οποία θα περιλαμβάνει τα χρώματα ξύλου που παράχθηκαν από το προηγούμενο σύστημα κόμβων.



Εικόνα 54 Μετατροπή υφής (material) ξύλου σε δισδιάστατη εικόνα υφής (texture) μέσω της λειτουργίας Bake του Blender.

5.5 Δημιουργία υφών μέσω τεχνητής νοημοσύνης

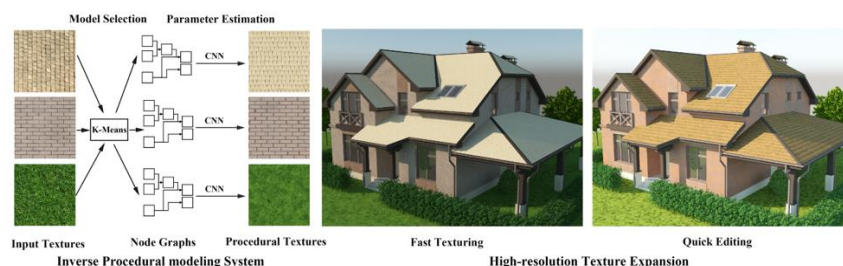
5.5.1 Δημιουργία υφών μέσω αυτόματης δημιουργίας κόμβων

Προηγουμένως αναφέρθηκε η τεχνική της σχεδίασης συστημάτων κόμβων διαφορετικής πολυπλοκότητας για τη δημιουργία μιας εικόνας υφής ή μιας υφής που θα εφαρμοστεί σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Το μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι ο καλλιτέχνης πρέπει να γνωρίζει ακριβώς τη λειτουργία κάθε κόμβου και να μπορεί να τους συνδέει μεταξύ τους. Επίσης, τέτοια συστήματα τείνουν να γίνονται περίπλοκα μετά από κάποιον συγκεκριμένο αριθμό κόμβων και δύσκολα στην τροποποίησή τους.

Οι Yíwei Hu et al. (2019) [57] ανέπτυξαν μια καινοτόμο τεχνική με τη βοήθεια νευρωνικών δικτύων για την παραγωγή γράφων μέσω εισόδου του τελικού θεμιτού αποτελέσματος εικόνας.

Δοθέντος μιας εικόνας υφής, το σύστημα μπορεί να επιλέξει κατάλληλους γράφους και να εφαρμόσει νευρωνικά δίκτυα (CNN-Convolutional Neural Network) εκπαιδευμένα έτσι ώστε να υπολογίσουν τις παραμέτρους σε αυτούς με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός συστήματος κόμβων που μπορεί να ανακατασκευάσει την αρχική εικόνα-υφή με την επιπρόσθετη δυνατότητα για αλλαγή των παραμέτρων της. Επίσης, είναι εφικτή η μετατροπή της αρχικής εικόνας σε υψηλότερη ανάλυση όπως 4k ή 8k λόγω της ανακατασκευής.

Παρακάτω φαίνεται η είσοδος μερικών εικόνων στο σύστημα CNN και το αποτέλεσμα που παράγεται, το οποίο ομοιάζει με την αρχική εικόνα αλλά έχει το πλεονέκτημα της παραμετροποίησης. Στη συνέχεια παρατηρείται η εφαρμογή αυτής της παραμετροποιημένης εικόνας σαν υφή σε ένα μοντέλο σπιτιού καθώς και η παραλλαγή της με την αλλαγή κάποιων παραμέτρων.



Εικόνα 55 Είσοδος εικόνων στο σύστημα CNN και μετατροπή τους σε παραμετροποιησimes (αριστερά). Εφαρμογή νέων εικόνων με τη μορφή υφών σε

μοντέλο σπιτιού (μεσαία) και παραλλαγή αυτών μέσω της επεξεργασία των παραμέτρων του συστήματος γράφου που παράχθηκε (δεξιά) [57].

Με την καταϊγιστική άνοδο της τεχνητής νοημοσύνης μέσω κειμένου ως είσοδο σε όλους τους κλάδους, οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης βοηθούν στη δημιουργία εικόνων υφών μέσω απλού κειμένου περιγραφής. Με μια επεξήγηση κειμένου για την εικόνα που πρέπει να παραχθεί, μέσω ειδικών μοντέλων που έχουν διδαχτεί να παράγουν εικόνες από μια βάση δεδομένων σε αντιστοιχία εικόνα υφής-κείμενο (pretrained models), παράγεται η τελική εικόνα ή μια σειρά από εικόνες περιμένοντας τον χρήστη να επιλέξει ποια του ταιριάζει καλύτερα. Οι Dave Zhenyu Chen et al. (2023) [86] παρουσίασαν ένα τέτοιο εργαλείο με όνομα Text2Tex. Βασικά χαρακτηριστικά αυτής της μεθόδου είναι ότι

1. Παράγει υψηλής ποιότητας εικόνων υφής για τρισδιάστατα μοντέλα
2. Επεξεργάζεται τα δεδομένα λαμβάνοντας υπόψη το βάθος ενός τρισδιάστατου μοντέλου.
3. Τα σημεία ραφής είναι εξαιρετικά χωρίς διάκριση ότι είναι κομμένα ή ότι έχει κάποια μορφή ασυνέχειας (seamless textures).
4. Δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει περεταίρω σημεία του μοντέλου του και να δημιουργήσει εκ νέου κάποια εικόνα για να εφαρμοστεί στο συγκεκριμένο σημείο του μοντέλου.

Είναι ανώτερο συγκριτικά με παρόμοιες τεχνικές όπως CLIPMesh και Latent-Paint όπως θα δούμε στην παρακάτω εικόνα με παράδειγμα κειμένου εισαγωγής ένα ασθενοφόρο.

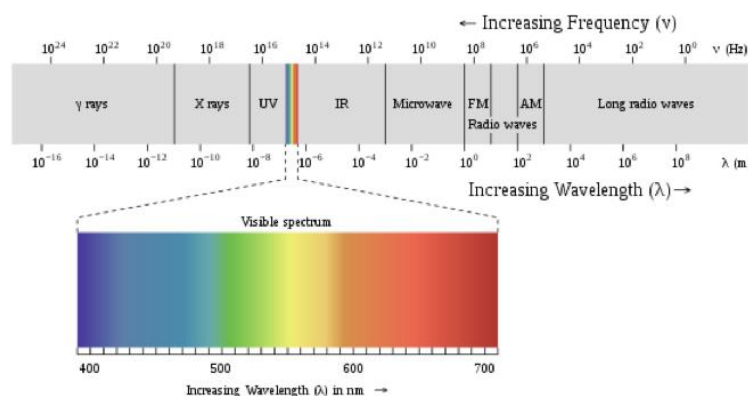


Εικόνα 56 Αποτέλεσμα των παραπάνω τεχνικών ως είσοδος στο ασθενοφόρο [86].

Παρατηρούμε πως το αποτέλεσμα του Text2tex είναι πιο ρεαλιστικό, με περισσότερη λεπτομέρεια, ευθείες γραμμές και ευδιάκριτα χαρακτηριστικά. Το πιο δυνατό του σημείο είναι ότι αν βλέπαμε αυτό το ασθενοφόρο σε κάποιο βιντεοπαιχνίδι, δεν θα υπήρχε υποψία πως δεν το σχεδίασε κάποιος άνθρωπος αλλά ένας υπολογιστής.

Κεφάλαιο 6 Σκίαση και Φωτισμός

Το φως είναι ένα συλλογικό άθροισμα ενέργειας σε πολλά διαφορετικά μήκη κύματος, κάθε μήκος κύματος σχετίζεται με ένα συγκεκριμένο (ορατό) χρώμα. Η εκπεμπόμενη ενέργεια μιας πηγής φωτός μπορεί επομένως να θεωρηθεί ως συνάρτηση όλων των διαφορετικών μηκών κύματος. Τα μήκη κύματος μεταξύ 390nm έως 700nm (νανόμετρα) θεωρούνται μέρος του φάσματος ορατού φωτός, δηλαδή αυτά που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο μάτι [58].



Εικόνα 57 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, με το ορατό τμήμα να επισημαίνεται [58]

Ο φωτισμός σε μια σκηνή βιντεοπαιχνιδιού μπορεί να προσελκύσει ή να απωθήσει τον θεατή αναλόγως με τον σκοπό τοποθέτησής του. Στα παλαιότερα παιχνίδια, τότε που η υπολογιστική δύναμη της τεχνολογίας δεν ήταν τόσο ισχυρή όσο σήμερα, ο φωτισμός στα παιχνίδια ήταν απλός. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνταν δεν ήταν περίπλοκες καθώς δινόταν περισσότερη προσοχή από τους προγραμματιστές στα χρώματα των υφών έτσι ώστε να ξεγελάσουν τον θεατή στον τομέα αυτόν. Μειονέκτημα αυτού του τρόπου ήταν πως τα διάφορα χρώματα ενός χαρακτήρα δεν αλληλοεπιδρούσαν σε διαφορετικά σενάρια φωτισμού, εξωτερικού και εσωτερικού χώρου. Σήμερα, οι περισσότερες μηχανές παιχνιδιών χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα και φυσικούς νόμους που παράγουν ρεαλιστικές ανακλάσεις φωτισμού.

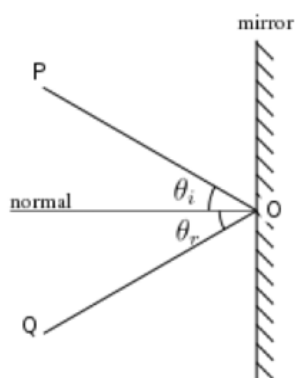
Η μηχανή κατασκευής βιντεοπαιχνιδιών Unity αποδίδει γραφικά βάσει Φυσικής (Physically Based Rendering) προκειμένου να προσομοιώσει με ακρίβεια διάφορα ρεαλιστικά σενάρια φωτισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με shaders – κομμάτια κώδικα που υπολογίζουν με μαθηματικές εξισώσεις το πώς πρέπει να εμφανίζεται ένα υλικό υπό

διαφορετικές συνθήκες φωτισμού. Shaders είναι κώδικες που τρέχουν στην κάρτα γραφικών. Υπάρχουν τα fragment shaders και τα vertex shaders.

Τα fragment shaders αφορούν κάθε εικονοστοιχείο που θα προκύψει από την κάθε όψη (face) του μοντέλου μας. Η κάρτα γραφικών, δηλαδή, τρέχει για κάθε pixel τον ίδιο fragment κώδικα για να δώσει στην οθόνη το τελικό χρώμα του κάθε pixel από την κάθε όψη του μοντέλου. Τα vertex shaders αφορούν κάθε vertex (κορυφή) του μοντέλου μας και είναι υπεύθυνα για να αλλάξουν τη θέση των σημείων του μοντέλου ή το χρώμα του και την υφή του με μαθηματικές πράξεις στα δεδομένα τους [59].

6.1 Ανάκλαση φωτισμού

Η κατοπτρική ανάκλαση (Specular reflection) είναι ορατή μόνο όταν το κάθετο διάνυσμα της επιφάνειας είναι προσανατολισμένο ακριβώς στα μισά της κατεύθυνσης του εισερχόμενου φωτός και της κατεύθυνσης του θεατή. Αυτό ονομάζεται κατεύθυνση μισής γωνίας επειδή διαιρεί στο μισό τη γωνία μεταξύ του εισερχόμενου φωτός και του θεατή. Επομένως, μια απολύτως λεία επιφάνεια που ανακλά κάθε φως, θα έδειχνε μια κατοπτρική επισήμανση (specular highlight) ως την απόλυτα ευκρινή ανακλώμενη εικόνα μιας πηγής φωτός. Ωστόσο, πολλά γυαλιστερά αντικείμενα παρουσιάζουν θολές αντανάκλασεις.



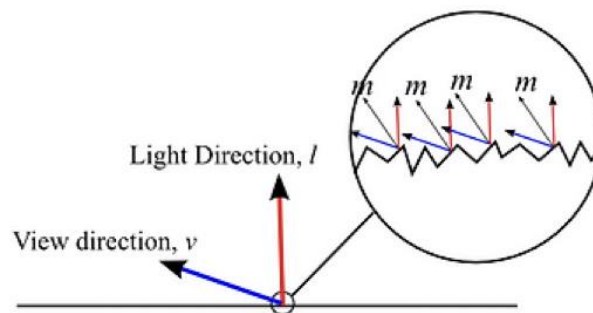
Εικόνα 58 Τέλειος κατοπτρικός ανακλαστήρας [60]

Αυτό συμβαίνει επειδή το φως διαχέεται στην επιφάνεια του αντικειμένου μιας και κάθε αντικείμενο δεν έχει μια απολύτως λεία επιφάνεια αλλά μια επιφάνεια που αποτελείται από πολύ μικρές όψεις, τις μικροόψεις, καθεμία από τις οποίες είναι πιθανώς τέλειος κατοπτρικός ανακλαστήρας.

Αυτές οι μικροόψεις έχουν κάθετα διανύσματα που δείχνουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Ο βαθμός στον οποίο αυτά τα διανύσματα διαφέρουν από την κανονική λεία επιφάνεια καθορίζεται από την τραχύτητα της επιφάνειας [61].

Όσο πιο τραχιά είναι η επιφάνεια, τόσο περισσότερες πιθανότητες υπάρχουν για διαταραχές στις κατοπτρικές επισημάνσεις (specular highlight). Εξαιτίας αυτού, οι τραχείς επιφάνειες έχουν μεγαλύτερες και πιο αμυδρές ή θολές ανακλάσεις φωτός. Οι λείες επιφάνειες μπορούν να προκαλέσουν τη συμπίεση του specular highlight καθώς το φως αντανακλάται τέλεια.

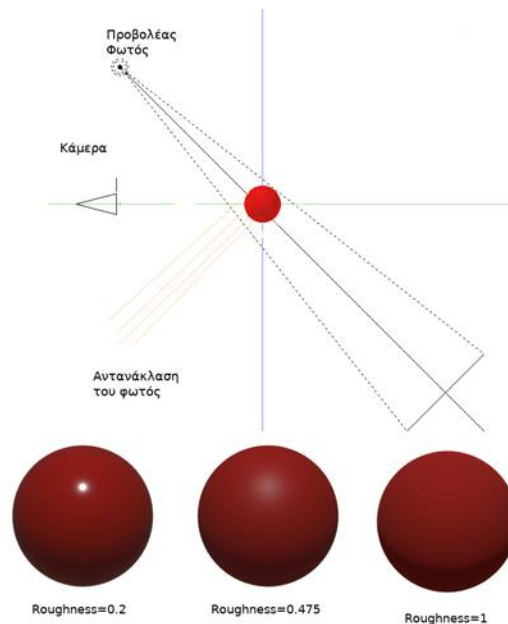
Στην εικόνα που ακολουθεί παρατηρείται μια φαινομενικά λεία επιφάνεια αλλά αν η εικόνα μεγεθυνθεί, σε ένα μέρος της επιφάνειας θα εμφανιστεί πως υπάρχουν μικρές κοιλάδες και λοφίσκοι. Αυτό το φαινόμενο προσομοιώνει η συνάρτηση specular highlight μέσω της παραμέτρου roughness χωρίς να υφίσταται το αντίστοιχο πλέγμα με χιλιάδες κορυφές αλλά ένα απλούστερο για λόγους γρηγορότερης εκτέλεσης.



Εικόνα 59 Οι μικροόψεις μιας φαινομενικά λείας επιφάνειας που στην πραγματικότητα είναι ελάχιστα τραχιά [62]

Παρακάτω απεικονίζεται ένα παράδειγμα μιας κόκκινης σφαίρας, η γωνία κάμερας που εστιάζει επάνω της και ένας προβολέας λευκού φωτός που βρίσκεται ψηλότερα από τη σφαίρα με κατεύθυνση προς αυτήν. Η τιμή roughness καθορίζει την τραχύτητα της υφής και είναι στο εύρος τιμών από 0 μέχρι 1. Για τιμές κοντά στο 0, η επιφάνεια τείνει να είναι απολύτως λεία ενώ για τιμές κοντά στο 1, η επιφάνεια τείνει να είναι πολύ τραχιά, δηλαδή οι μικροόψεις της να είναι πολλές και με διαφορετικές γωνίες καθολικής ανάκλασης. Παρατηρούμε πως όταν η επιφάνεια είναι πολύ λεία, αντανακλώντας το φως εμφανίζεται μια μικρή λευκή κουκκίδα η οποία είναι η ανάκλαση του φωτός. Όσο μεγαλώνει η τραχύτητα, η ανάκλαση αυτή μεγαλώνει και θολώνει μέχρι να εξαφανιστεί όταν η

τραχύτητα είναι μέγιστη διαχέοντας το άσπρο φως σε μεγάλο μέρος της επιφάνειας της σφαίρας.



Εικόνα 60 Διερεύνηση ανάκλασης του φωτός σε σχέση με την τραχύτητα της σφαίρας μέσω του λογισμικού Blender.

6.1.1 Συνάρτηση Διανομής Αμφίδρομης Ανάκλασης

Η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για την ανάκλαση του φωτός σε μια αδιάφανη επιφάνεια ονομάζεται Συνάρτηση Διανομής Αμφίδρομης Ανάκλασης ή BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), ορισμένη πρώτα από τον Fred Nicodemus το 1965. Πρόκειται για μια συνάρτηση τεσσάρων πραγματικών μεταβλητών και χρησιμοποιεί την αρχή διατήρησης της ενέργειας (energy conservation) ελέγχοντας τον τρόπο που διαχέεται το φως σε μια επιφάνεια, και το ποσό αυτού που ανακλάται ή απορροφάται από την επιφάνεια.

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας είναι θεμελιώδης αρχή στη Φυσική και στις Θετικές επιστήμες και μεταφράζεται ως το αλγεβρικό άθροισμα όλων των συνιστωσών ενέργειας που εισέρχονται στο σύστημα που μελετάμε, το οποίο μένει σταθερό σε σχέση με το σύνολο των ενεργειών που εξέρχονται από αυτό [63].

$$\sum_{i=1}^n IncomingEnergy_i = \sum_{i=1}^n OutgoingEnergy_i$$

Άρα, για να είναι η συνάρτηση BRD βασισμένη στην αρχή διατήρησης της ενέργειας πρέπει να διατηρεί την ενέργεια του φωτός σε κάθε πτώση των ακτινών του πάνω στα

αντικείμενα. Δηλαδή, το συνολικό μέγεθος φωτισμού που αντανακλάται από μια επιφάνεια πρέπει να είναι λιγότερο ή ίσο με το συνολικό μέγεθος που η επιφάνεια έλαβε εξ αρχής.

Η εξίσωση της BRDF αποτελείται από 3 μέρη συνολικά, την συνάρτηση Normal Distribution ($D(h)$), την Geometric Shadowing ($G(l,v,h)$) και την Fresnel ($F(v,h)$) συνάρτηση. Η συνάρτηση παίρνει σαν εισερχόμενες τιμές την κατεύθυνση του φωτός l , την κατεύθυνση του θεατή v και την half angle κατεύθυνση h (την κατεύθυνση της επιφάνειας-normal direction).

Ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f(l, v, h) = \frac{F(v, h)G(l, v, h)D(h)}{4(n \cdot l)(n \cdot v)}, f(l, v, h) \geq 0$$

Το διάνυσμα n είναι η κατεύθυνση της όψης στην οποία έπεσε η ακτίνα φωτός. Halfway vector ή h είναι το διάνυσμα που χωρίζει στη μέση τη γωνία μεταξύ του διανύσματος του φωτός και του διανύσματος του θεατή.

$$h = \frac{l + v}{\|l + v\|}$$

Όταν πέφτει μια ακτίνα φωτός σε μια επιφάνεια ή μια όψη, η αρχή διατήρησης της ενέργειας προσεγγίζεται με αυτόν τον τύπο: $\forall v \int_H f(v, l) \cos \theta_l dl = 1$, όπου H είναι ένα ημισφαίριο με βάση το normal της επιφάνειας [64].

Επομένως, τρεις είναι οι κύριες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την τεχνική Physically Based Rendering στην μηχανή παιχνιδιών Unity αλλά και γενικότερα σε άλλες μηχανές γραφικών που εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο (real-time).

1. Normal Distribution Function (NDF)
2. Geometric Shadowing Function (GSF)
3. Fresnel Function (FF)

Στα επόμενα υποκεφάλαια θα μελετηθούν αναλυτικά.

6.1.2 Συνάρτηση Κατανομής Κάθετων Διανυσμάτων - NDF

Η Συνάρτηση Κατανομής Κάθετων Διανυσμάτων (Normal Distribution Function) είναι ένα από τα τρία βασικά στοιχεία που αποτελούν τον BRDF shader. Περιγράφει την κατανομή

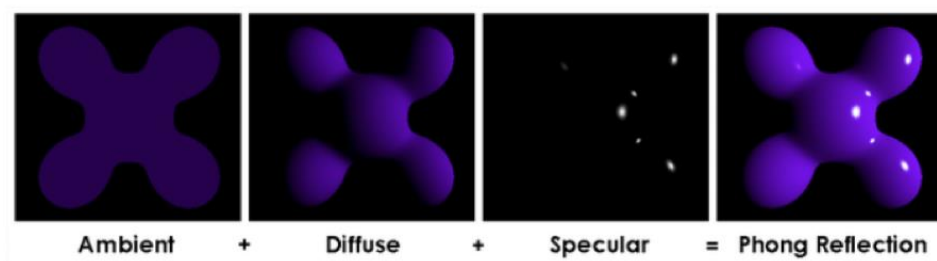
των κάθετων διανυσμάτων των μικροόψεων σε μια επιφάνεια. Χρησιμοποιεί ως σταθμισμένη συνάρτηση για την αυξομείωση της φωτεινότητας των αντανάκλασεων (specularity) των όψεων του μοντέλου μας. Για το λόγο αυτόν, θεωρείται ως βασική γεωμετρική ιδιότητα της επιφάνειας.

Phong NDF

Το μοντέλο αντανάκλασης Phong (ονομάζεται επίσης φωτισμός Phong) είναι ένα εμπειρικό μοντέλο, δηλαδή μια φόρμουλα που δεν βασίζεται σε κάποιο μαθηματικό θεώρημα, αλλά σε παρατηρήσεις και σε εμπειρία, του φωτισμού των σημείων σε μια επιφάνεια. Σχεδιάστηκε από τον ερευνητή γραφικών υπολογιστών Bui Tuong Phong στο Πανεπιστήμιο της Γιούτα το 1975 σαν διδακτορική διατριβή. Έχει γίνει το στάνταρ στις μέρες μας για απλό φωτισμό μοντέλων λόγω της γενικά αποδοτικής χρήσης του χρόνου υπολογισμού του φωτισμού ανά εικονοστοιχείο. Υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο.

$$k_{spec} = \|R\| \|V\| \cos^n \beta = (\hat{R} \hat{V})^n$$

Όπου R είναι η καθρεπτική ανάκλαση του διανύσματος του φωτός της επιφάνειας, V είναι το διάνυσμα του θεατή. Το n ονομάζεται Phong exponent και καθορίζεται από τον χρήστη για να ελεγχθεί η τραχύτητα της επιφάνειας [62].

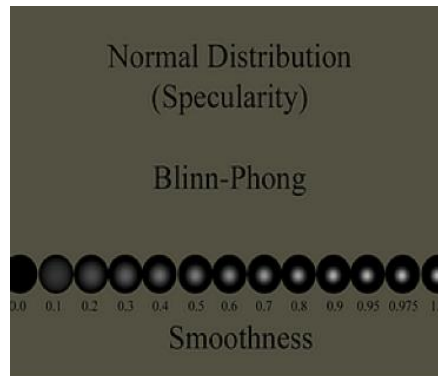


Εικόνα 61 Το φως είναι άσπρο, τα χρώματα Diffuse (χρώμα αντικειμένου), Ambient (γενικό φως στον χώρο που προκύπτει από όλα τα αντικείμενα του χώρου) είναι μπλε. Το Specular χρώμα είναι άσπρο [65].

Blinn-Phong NDF

Η προσέγγιση Blinn του μοντέλου φωτισμού Phong σχεδιάστηκε από τον Jim Blinn σαν βελτιστοποίηση του. Ο Blinn έκρινε πως είναι γρηγορότερο να υπολογιστεί το εσωτερικό γινόμενο (dot product) του κάθετου διανύσματος με το διάνυσμα H (Half vector-το διάνυσμα μεταξύ θεατή και πηγής φωτός) από τον υπολογισμό του διανύσματος ανάκλασης για κάθε καρέ. Οι τιμές των εικονοστοιχείων μεταξύ κορυφών παρεμβάλλονται

(interpolate) από τη σκίαση Gouraud, αντί για την πιο ακριβή υπολογιστική σκίαση Phong. Το αποτέλεσμα είναι πιο ομαλό από του Phong (το Blinn μοντέλο έχει περισσότερη θόλωση ενώ το Phong έχει κοφτερές γραμμές στα σημεία ανάκλασης φωτός). Χρησιμοποιείται περισσότερο για πιο καλλιτεχνικού στυλ αποτελέσματα. Παρακάτω φαίνεται η ανάκλαση του φωτός με βάση την ομαλότητα (το αντίθετο της τραχύτητας) της επιφάνειας.



Εικόνα 62 Blinn-Phong σκίαση με βάση την τιμή Smoothness (ομαλότητα της επιφάνειας) [62].

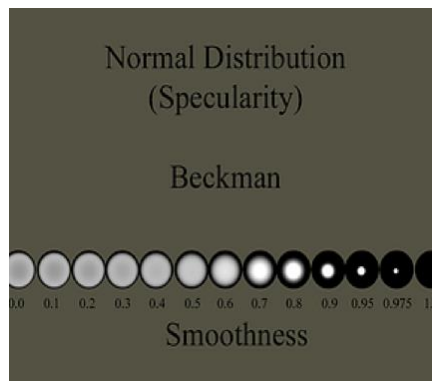
Beckmann NDF

Ένα φυσικό μοντέλο Συνάρτηση Κατανομής Κάθετων Διανυσμάτων μικροόψεων είναι η διανομή Beckmann. Σε αντίθεση με άλλες εμπειρικές μεθόδους, η διανομή Beckmann υπακούει στην αρχή διατήρησης της ενέργειας δίδοντας την απόλυτη ποσότητα ανάκλασης χωρίς να εισάγει αυθαίρετες σταθερές. Το αρνητικό αυτής της μεθόδου είναι ο υψηλός υπολογιστικός χρόνος που απαιτεί. Είναι καλή μέθοδος για υλικά με βάση το μέταλλο όταν η τιμή της ομαλότητας είναι μεταξύ 0.5 και 0.8 ενώ όταν είναι μεταξύ 0 και 0.5 είναι καλή για πλαστικά αντικείμενα. Ο τύπος της είναι ο εξής:

$$k_{spec} = \frac{\exp(-\tan^2(a)/m^2)}{\pi m^2 \cos^4(a)} a = \arccos(N \cdot H)$$

Μπορεί να απλοποιηθεί αφού:

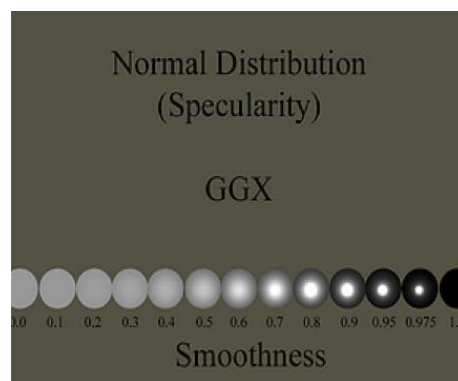
$$\tan^2(a)/m^2 = \frac{1 - \cos^2(a)}{\cos^2(a)m^2}$$



Εικόνα 63 Σκίαση μέσω της συνάρτησης του Beckmann βάσει της τραχύτητας του μοντέλου σφαίρας [62].

GGX NDF

Ο αλγόριθμος GGX είναι από τους πιο διαδεδομένους. Δημιουργήθηκε από τον Bruce Walter και τον Kenneth Torrance και χρησιμοποιείται από πολλές μοντέρνες τεχνολογίες στις BRD συναρτήσεις τους. Στο ίδιο άρθρο αναπτύχθηκε και ο αλγόριθμος Trowbridge-Reitz με παρόμοια αποτελέσματα με τον GGX, με τη μόνη διαφορά ότι ο δεύτερος παράγει ομαλότερες ανακλάσεις.



Εικόνα 64 Σκίαση μέσω του αλγορίθμου των Walter, Torrance [62].

Trowbridge-Reitz Anisotropic NDF

Επιπροσθέτως, εφευρέθη και ο αλγόριθμος Trowbridge-Reitz Anisotropic για ανισοτροπικά υλικά. Ανισοτροπικά υλικά ονομάζονται αυτά που αλλάζουν τις ιδιότητές τους με βάση την κατεύθυνση θέαςής τους. Παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι η μεταλλική βάση μιας κατσαρόλας, τα ανθρώπινα μαλλιά κ.α..



Εικόνα 65 Ανισοτροπική ιδιότητα σε μεταλλική κατσαρόλα (αριστερά) μέσα από το λογισμικό Blender, μαλλιά (μεσαία εικόνα) [66]. Σκίαση μέσω Trowbridge-Reitz Anisotropic [62].

Geometric Shadowing Function – GSF

Η Συνάρτηση Geometric Shadowing ή αλλιώς Συνάρτηση Γεωμετρικής Σκιάς ή Εξασθένισης φωτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει την εξασθένιση του φωτός λόγω της αυτοσκίασης των μικροόψεων. Αυτή η μέθοδος μοντελοποιεί την πιθανότητα ότι, σε ένα δεδομένο σημείο, οι μικροόψεις αυτό-αποκλείονται μεταξύ τους ή ότι το φως αναπηδά σε πολλαπλές μικροόψεις.

Κατά τη διάρκεια αυτών των πιθανοτήτων, το φως χάνει ενέργεια πριν φτάσει στον θεατή. Σημαντικό ρόλο έχει και η τραχύτητα της επιφάνειας των όψεων αυτών. Υπάρχουν πολλές συναρτήσεις που δεν περιλαμβάνουν την τραχύτητα στους αλγορίθμους τους και ενώ εξακολουθούν να παράγουν αξιόπιστα αποτελέσματα, δεν ταιριάζουν σε πολλές χρήσεις από αυτές που την υπολογίζουν.

Η Συνάρτηση Γεωμετρικής Σκιάς είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ενέργειας στους αλγορίθμους BRDF. Χωρίς την GSF, το BRDF μπορεί να αντανακλά περισσότερη φωτεινή ενέργεια από ό,τι λαμβάνει. Ένα βασικό μέρος της εξίσωσης BRDF σχετίζεται με την αναλογία μεταξύ της ενεργού επιφάνειας (η περιοχή που καλύπτεται από επιφανειακές περιοχές που αντανακλούν την ενέργεια φωτός) και τη συνολική επιφάνεια των μικροόψεων. Εάν η σκίαση και η κάλυψη δεν λαμβάνονται υπόψη, τότε η ενεργή περιοχή μπορεί να υπερβεί τη συνολική περιοχή, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην BRDF να μη διατηρεί την ενέργεια, σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω δραστικών ποσοτήτων.

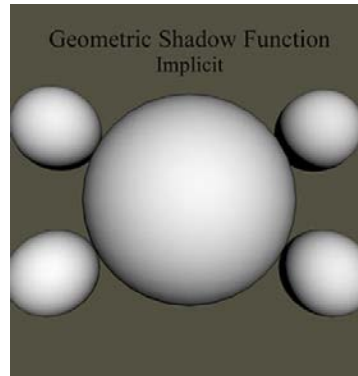
Implicit GSF

Το Implicit GSF είναι η βάση της λογικής πίσω από το Geometric Shadowing. Πολλαπλασιάζοντας το εσωτερικό γινόμενο του κάθετου διανύσματος της όψης με το

διάνυσμα του θεατή, έχουμε μια ακριβή εικόνα για το πως το φως επηρεάζει την επιφάνεια ενός αντικειμένου με βάση την οπτική μας γωνία.

$$G_s = (N \cdot L) * (N \cdot V)$$

Όπου N το κάθετο διάνυσμα όψης, L η κατεύθυνση του φωτός και V ο θεατής.



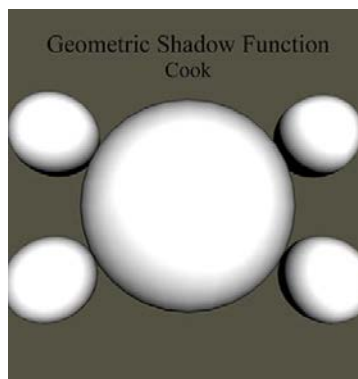
Εικόνα 66 Αυτοσκίαση μέσω της συνάρτησης Implicit GSF [62].

Cook-Torrance GSF

Το Cook-Torrance GSF δημιουργήθηκε για να λύσει τρεις καταστάσεις στη γεωμετρική εξασθένηση.

1. Η πρώτη περίπτωση αφορά την ανάκλαση του φωτός χωρίς παρεμβολές, ενώ
2. η δεύτερη περίπτωση αναφέρει ότι μέρος του ανακλώμενου φωτός εμποδίζεται/αποκλείεται μετά την ανάκλαση και
3. η τρίτη περίπτωση δηλώνει ότι μέρος του φωτός είναι αποκλεισμένο πριν φτάσει στην μικροόψη.

$$G_s = \min(1, \min(2 * N \cdot H * N \cdot V / V \cdot H, 2 * N \cdot H * N \cdot L / V \cdot H))$$



Εικόνα 67 Σκίαση μέσω Cook-Torrance GSF [62].

6.1.3 Συνάρτηση Fresnel – FF

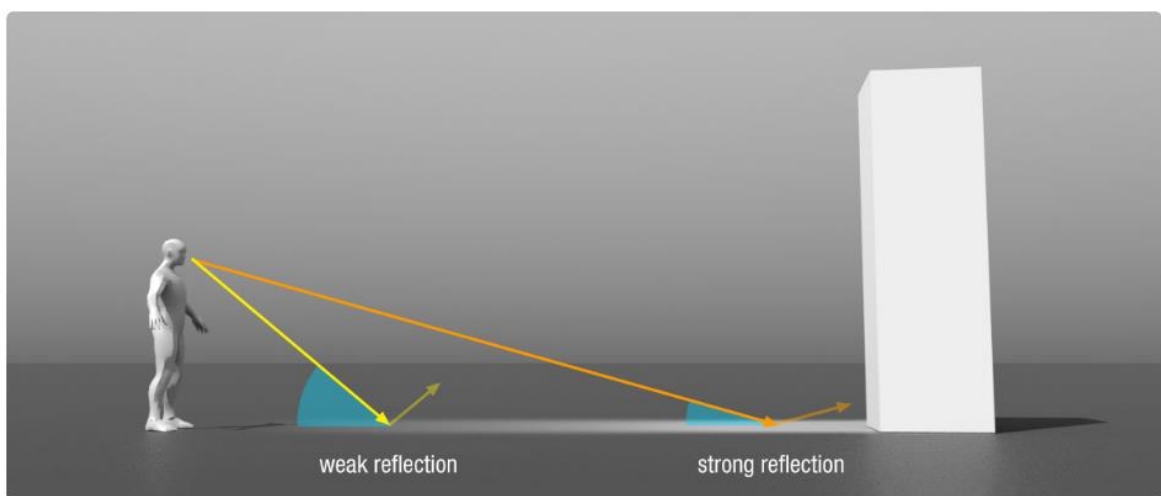
Οι εξισώσεις Fresnel περιγράφουν την αναλογία φωτός που ανακλάται έναντι του φωτός που διαθλάται, η οποία διαφέρει από τη γωνία θέασης της επιφάνειας. Δηλαδή δηλώνει πως η δύναμη των ανακλάσεων σε μια επιφάνεια είναι συγχρόνως εξαρτώμενη από τη γωνία θέασης.

Δημιουργήθηκαν από τον Γάλλο Φυσικό Augustin-Jean Fresnel που ήταν ο πρώτος που κατάλαβε ότι το φως είναι ένα εγκάρσιο κύμα, παρόλο που κανείς δεν συνειδητοποίησε ότι οι "δονήσεις" του κύματος ήταν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Για πρώτη φορά, η πόλωση θα μπορούσε να γίνει κατανοητή ποσοτικά, καθώς οι εξισώσεις του Fresnel προέβλεπαν σωστά τη διαφορετική συμπεριφορά των κυμάτων των πόλων s και p που συμβαίνουν σε μια διεπαφή υλικού.

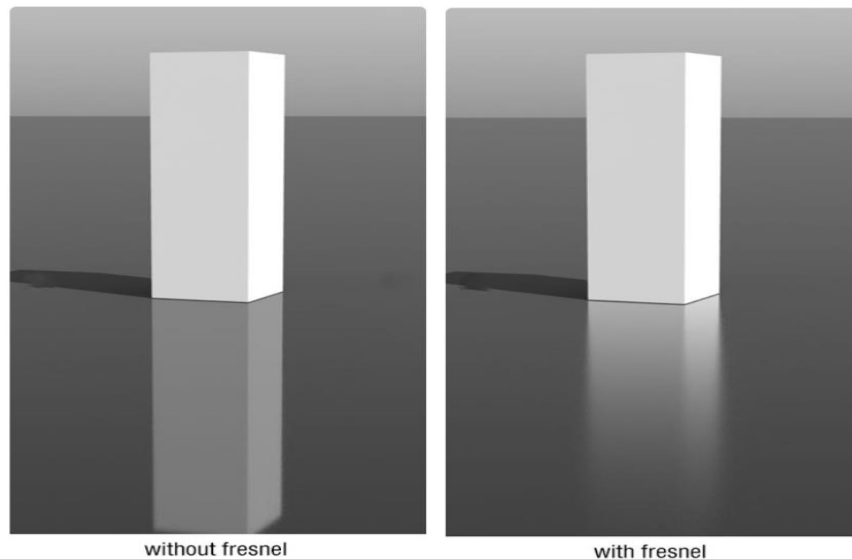
Οι ανακλάσεις κάθε επιφάνειας φαίνονται πιο έντονες όταν η γωνία θέασης είναι μικρότερη των ενενήντα μοιρών. Αντίθετα, όταν είναι κοντά στις ενενήντα μοίρες, οι ανακλάσεις τείνουν να εξαφανίζονται.

Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί, όταν ο θεατής κοιτάζει την ξύλινη ή μεταλλική επιφάνεια του γραφείου του από ψηλά σχηματίζοντας γωνία 90 μοιρών σε σχέση με αυτό, τότε οι ανακλάσεις είναι μηδαμινές. Αντιθέτως, εάν ο θεατής πλησιάσει πολύ προς το γραφείο υπό μια μικρή γωνία και κοιτάξει προς τα εκεί που τελειώνει το γραφείο, θα διαπιστώσει πως οι ανακλάσεις είναι εντονότερες.

Πολλοί παρατηρούν αυτό το φαινόμενο καθημερινά, όταν βρίσκονται σε έναν διάδρομο σχολείου με λεία επιφάνεια δαπέδου και κατάλληλο φωτισμό.



Εικόνα 68 Βαθμός ανάκλασης βάση της γωνίας θέασης [67].



Εικόνα 69 Εφέ ανάκλασης Fresnel βάση τη γωνία θέασης [67].

Όλες οι επιφάνειες ανακλούν θεωρητικά πλήρως το φως, εάν φαίνονται από τέλειες γωνίες 90 μοιρών. Η εξίσωση Fresnel είναι μια μάλλον περίπλοκη εξίσωση, αλλά μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$R(\theta) = R_0 + (1 - R_0)(1 - \cos\theta)^5$$

Όπου $R(\theta)$ είναι η πιθανότητα της ανάκλασης όταν η γωνία της ακτίνας του φωτός είναι θ , R_0 είναι η πιθανότητα της ανάκλασης σε κανονική γωνία δηλαδή $\theta=0$.

$$R_0 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

Παρακάτω φαίνεται μια σφαίρα, στην οποία παρατηρούμε πως στα άκρα της οι ανακλάσεις είναι πιο έντονες (λευκό χρώμα) ενώ στο κέντρο της σφαίρας, οι ανακλάσεις είναι μηδαμινές (μαύρο χρώμα) αφού ο θεατής σχηματίζει γωνία 90 μοιρών με το κάθετο διάνυσμα εκεί.



Εικόνα 70 Φαινόμενο Fresnel σε μια σφαίρα στο λογισμικό Blender.

Schlick Fresnel

Η προσέγγιση του Schlick για την εξίσωση Fresnel είναι από τις πιο διάσημες. Μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την ανάκλαση ενός αντικειμένου σε μικρές γωνίες θέασης μέσω των κάτωθι εξισώσεων.

$$N * L = \max(0, \text{PixelNormal} * \text{LightDir})$$

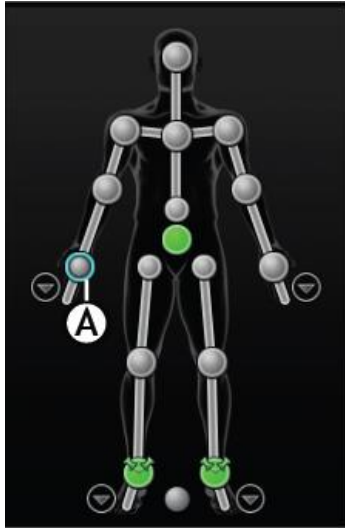
$$\text{SchlickFresnel} = \text{SpecColor} + (1 - \text{SpecColor}) \cdot (1 - N * L)^5$$

Όπου SpecColor είναι το χρώμα της ανάκλασης του φωτός, PixelNormal είναι το κάθετο διάνυσμα που αντιστοιχεί στο Pixel που υπολογίζεται και LightDir είναι η κατεύθυνση του φωτός.

Κεφάλαιο 7 Rigging και Animation

7.1 Rigging

7.1.1 Δημιουργία συστήματος σκελετού



Εικόνα 71 Ιεραρχία
Σκελετού με σχέση
πατέρα-παιδιού [84]

Για την κίνηση ενός μοντέλου απαιτείται ένας σκελετός από αντικείμενα που είναι κατάλληλα τοποθετημένα και ιεραρχημένα όπως έχει ένας πραγματικός άνθρωπος. Στα σημεία που είναι θεμιτό να λυγίσουν τα κόκαλα, πρέπει να ενώνονται δύο από αυτά όπως και στην πραγματική ζωή. Πολλά τέτοια οστά έχουν μια σχέση ιεραρχίας πατέρα-παιδιού έτσι ώστε το παιδί να κινείται αυτόνομα ενώ παράλληλα ακολουθεί την κίνηση του γονέα. Αυτό το σύστημα ονομάζεται rig και η διαδικασία δημιουργίας του ονομάζεται rigging.

Αριστερά, παρατηρούμε τις κλειδώσεις του σκελετού που απεικονίζονται με έναν γκρι κύκλο, τα κόκκαλά του με γκρι γραμμές, και τα ονόματα των κλειδώσεων. Εάν είναι

συμμετρικός ο σκελετός, είναι σύνηθες στο τέλος του ονόματος να υπάρχει το γράμμα A (αριστερά) ή Δ (δεξιά), υποδηλώνοντας πως πρόκειται για συμμετρικό σκελετό.

Υπάρχουν δύο διαδεδομένοι τρόποι για να υλοποιηθεί αυτό το σύστημα οστών.

1. Με χειρωνακτική εργασία
2. Με τη χρήση αλγορίθμων αυτοματοποίησης

Στην πρώτη περίπτωση, ο υπεύθυνος του rigging τοποθετεί τα οστά στις αρθρώσεις προσέχοντας να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά τοποθετημένα έτσι ώστε να μην προκύψουν προβλήματα σε επόμενα στάδια. Αυτή η διαδικασία απαιτεί πολλές μετατοπίσεις και περιστροφές των οστών με αποτέλεσμα να σπαταλιέται αρκετός χρόνος σε θέματα που μπορούν να επιλυθούν με τη βοήθεια αλγορίθμων ειδικά για αυτόν τον σκοπό.

Στη δεύτερη περίπτωση, η χρήση αλγορίθμων που εντοπίζουν τις αρθρώσεις του μοντέλου με τη βοήθεια ή μη του χρήστη καθιστά τη διαδικασία αρκετά γρήγορη και βέλτιστη. Ουσιαστικά ο χρήστης ορίζει κάποια βασικά σημεία αρθρώσεων όπως οι καρποί και οι

γοφοί και το εκάστοτε πρόγραμμα υπολογίζει τα υπόλοιπα σημεία με αποτέλεσμα να δημιουργεί έναν σκελετό κατάλληλα ιεραρχημένο.

Για να κινηθεί το μοντέλο από τον σκελετό αυτό πρέπει να ορισθεί η σχέση των κορυφών με τα οστά. Κάθε οστό έχει ένα σύνολο κορυφών που τις επηρεάζει. Για κάθε κορυφή ορίζεται μια τιμή επιρροής από 0 έως 1 και εισάγεται το σύνολο του οστού που είναι κοντύτερα προς αυτήν. Τα σύνολα αυτά ονομάζονται vertex groups και οι τιμές επιρροής των κορυφών αποκαλούνται vertex weights.

Παρακάτω φαίνεται ένα στιγμιότυπο του οστού που μετασχηματίζει το κεφάλι. Με κόκκινο απεικονίζονται τα vertices που έχουν βάρος 1, με μπλε εκείνα που έχουν βάρος 0 και δεν επηρεάζονται από το οστό και με ενδιάμεσα χρώματα απεικονίζεται η επιρροή με ενδιάμεσες τιμές από 0 μέχρι 1.



Εικόνα 72 Vertex Weights για το οστό που μετασχηματίζει το κεφάλι μέσω του λογισμικού Blender.

7.1.2 Αυτόματη δημιουργία σκελετού

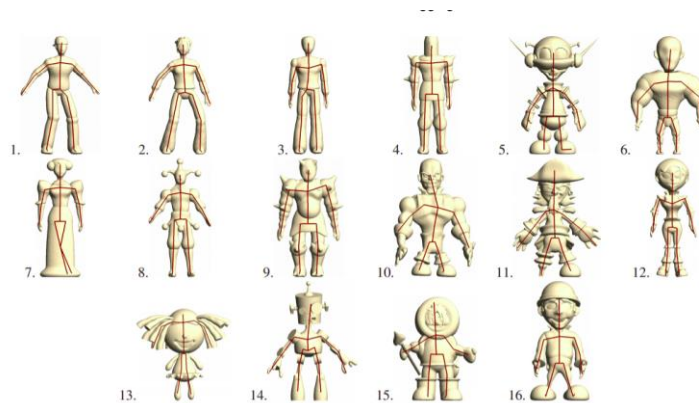
Ένα σημαντικά χρονοβόρο στάδιο στην κατασκευή βιντεοπαιχνιδιών είναι αυτό της δημιουργίας κίνησης ενός χαρακτήρα. Αυτό διότι ένας χαρακτήρας κινεί δεκάδες κόκαλα του σώματός του ακόμα και για την πιο μικρή κίνηση που θα εκτελέσει. Έτσι ο καλλιτέχνης που έχει αναλάβει αυτήν την εργασία χρειάζεται εργαλεία και έξυπνους αλγορίθμους που θα ελαττώσουν το φόρτο εργασίας του επαναχρησιμοποιώντας παλαιότερες κινήσεις ή χρησιμοποιώντας τη βοήθεια της φυσικής και τους νόμους της.

Την επαναχρησιμοποίηση ήδη υπάρχοντων κινήσεων με αυτόματη τοποθέτηση σκελετού στον χαρακτήρα επέλεξαν να εφαρμόσουν οι G. Jin, M. Tu et al. (2018) [68] στο επιστημονικό σύγγραμμά τους «Εκπαίδευση κυβερνοασφάλειας βασισμένη σε παιχνίδια

για μαθητές Λυκείου». Συγκεκριμένα επέλεξαν το διαδικτυακό πρόγραμμα Mixamo της εταιρείας Adobe όπου δίνονται μερικά σημεία του χαρακτήρα σε αυτό, και γίνεται αυτόματα η σκελετοποίηση του μοντέλου με την δυνατότητα για προσθήκη ήδη δημιουργημένων κινήσεων όπως περπάτημα, ομιλία, καθίσματα, χτυπήματα, τρέξιμο κ.λπ. Το Mixamo παρέχει τη δυνατότητα για εξαγωγή σε FBX format (τύπος αρχείου ειδικό για αντικείμενα με σκελετό και κίνηση).

Προκάτοχος του Mixamo αποτελούσε το αυτοματοποιημένο σύστημα που δημιούργησαν οι Baran & Popovic (2007) [69] με το οποίο ο χρήστης μπορεί να δώσει κίνηση στο τρισδιάστατο μοντέλο. Προηγούμενες τεχνικές χρειάζονταν έναν εξειδικευμένο χρήστη για να εφαρμόσει σωστά το σκελετικό σύστημα στο σώμα του μοντέλου του και να ορίσει τα σημεία σώματος που παραμορφώνει το κάθε οστό.

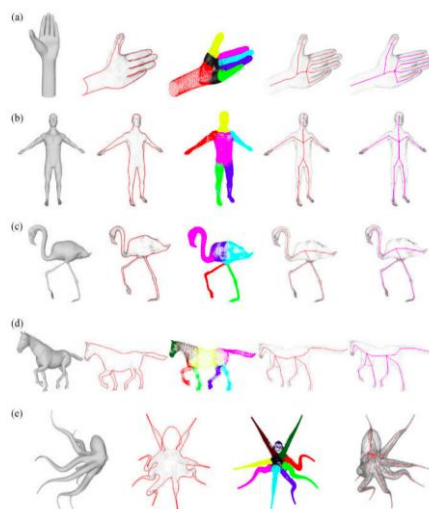
Με το πρόγραμμά τους που ονομάστηκε Pinocchio, αυτή η διαδικασία γινόταν αυτόματα δοθέντος ενός στατικού μοντέλου και ενός σκελετού σε ανθρώπινη μορφή. Το σύστημα αυτό θα προσαρμόσει τον σκελετό στο μοντέλο. Επειδή ο σκελετός δεν αλλάζει σε σχέση με το σχήμα ενός ανθρώπου, αυτό το σύστημα μπορούσε να επαναχρησιμοποιηθεί σε πολλών ειδών σώματα και να εφαρμόσει μια βιβλιοθήκη κινήσεων που είχαν δημιουργήσει οι ερευνητές.



Εικόνα 73 Αυτόματο Rigging (σκελετοποίηση) ανθρώπινου χαρακτήρα με το πρόγραμμα Pinocchio [69].

Οι παραπάνω τεχνικές αφορούν αυστηρά και μόνο χαρακτήρες με ανθρώπινη μορφή και συγκεκριμένη σιλουέτα. Αν εφαρμοζόταν ο αλγόριθμος σε μη δίποδα, όπως κάποιο ζώο ή δίποδα με διαφορετικό σκελετό από του ανθρώπου, η σκελετοποίηση και οι κινήσεις δε θα λειτουργούσαν όπως θα περιμέναμε.

Έτσι οι Pan et al. (2009) [70] δημιούργησαν ένα πιο εξειδικευμένο αυτόματο σύστημα συσχέτισης σκελετού με τρισδιάστατο μοντέλο. Συγκεκριμένα, το σύστημά τους επεξεργάζεται τη σιλουέτα του αντικειμένου και τμηματοποιεί σε κομμάτια (segments) το μοντέλο, δημιουργεί τα οστά με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Το σύστημά τους δεν είναι αποκλειστικά για ανθρώπινα σώματα. Αντιθέτως, ανταπεξέρχεται εξαιρετικά σε δίποδα ζώα όπως ο πελεκάνος, το άλογο και το χταπόδι.



Εικόνα 74 Αυτόματη Τμηματοποίηση (Segmentation) και Σκελετοποίηση (Rigging) σε ανθρώπινα και μη μοντέλα [70].

7.2 Animation

Animation ή αλλιώς κίνηση στον ψηφιακό κόσμο ορίζεται ως η εξαιρετικά γρήγορη εναλλαγή των καρέ μέσα σε ένα δευτερόλεπτο, με κάθε καρέ να αποτυπώνει μια πόζα ενός χαρακτήρα ή αντικειμένου για την εκάστοτε χρονική στιγμή. Οι τυπικές εναλλαγές που γίνονται συνήθως μέσα σε ένα δευτερόλεπτο είναι 24 ή 30, δηλαδή 24 και 30 frames per second (fps) αντίστοιχα.

7.2.1 Interpolation

Εφόσον η κίνηση αποτελείται από πολλά καρέ ανά δευτερόλεπτο με σκοπό να δοθεί στον θεατή η ψευδαίσθηση της κίνησης μέσω της γρήγορης εναλλαγής αυτών, θα ήταν αρκετά χρονοβόρο και αντιπαραγωγικό για τον καλλιτέχνη να πραγματοποιήσει τις μικρές αλλαγές στον σκελετό για κάθε καρέ και κάθε δευτερόλεπτο της συνολικής κίνησης.

Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται ευρέως οι παρεμβολές, είτε γραμμικές είτε τύπου spline. Οι παρεμβολές είναι συναρτήσεις που δημιουργούν επιπλέον σημεία ανάμεσα στα δοθέντα σημεία έτσι ώστε να παράγουν συνεχείς καμπύλες.

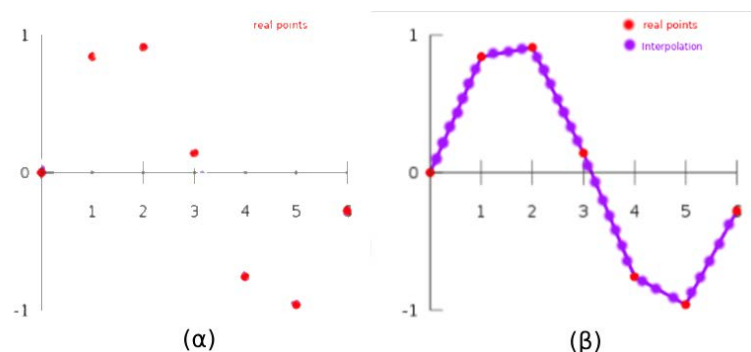
Με την τεχνική αυτή, ο καλλιτέχνης πραγματοποιεί μερικές πόζες σε ένα δευτερόλεπτο, όπου στην κάθε πόζα θέτει τους μετασχηματισμούς των οστών ενός σκελετού. Αυτοί οι μετασχηματισμοί μεταφράζονται σαν σημεία στον x, y και z άξονα. Μέσω της παρεμβολής που θα εφαρμοστεί, θα δημιουργηθεί κάθε σημείο που είναι ανάμεσα από τα ήδη υπάρχοντα σημεία του σχεδιαστή κίνησης. Έτσι, η κίνηση θα είναι ομαλή από καρέ σε καρέ χωρίς απότομες αλλαγές.

Linear interpolation

Η γραμμική παρεμβολή παράγει σημεία έτσι ώστε να δημιουργηθούν γραμμές ανάμεσα στα δοθέντα σημεία. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι οι απότομες εναλλαγές κατεύθυνσης μεταξύ των αρχικών σημείων. Συνήθως εφαρμόζεται σε ρομποτικές κινήσεις αντικειμένων και δεν ενδείκνυται για οργανικά μοντέλα. Ο μαθηματικός τύπος της είναι ο κάτωθι.

$$y = y_a + (y_b - y_a) \left(\frac{x - x_a}{x_b - x_a} \right)$$

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται τα αρχικά σημεία και τα παραγόμενα σημεία λόγω γραμμικής παρεμβολής αυτών.



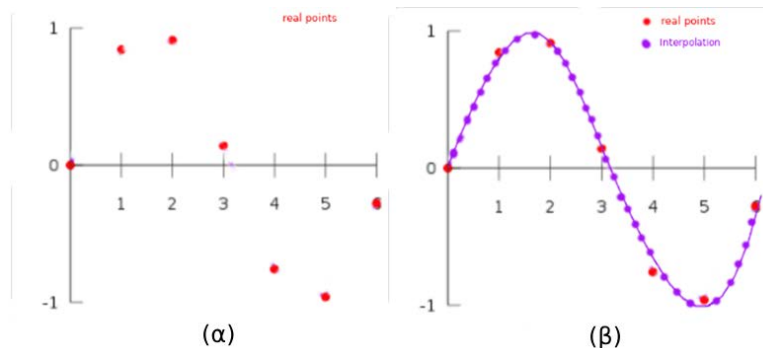
Εικόνα 75 Σημεία γραμμικής παρεμβολής (α), συνεχόμενη γραμμή μέσω των σημείων γραμμικής παρεμβολής (β) στο λογισμικό Matlab.

Spline interpolation

Οι Splines είναι πολυωνυμικές παραμετρικές καμπύλες που χρησιμοποιούνται συχνά στον τομέα των μαθηματικών. Οι παρεμβολές τύπου Spline είναι συναρτήσεις που παρεμβάλουν νέα σημεία στα ήδη υπάρχοντα και έχουν συνεχείς παραγώγους έως τον

βαθμό που είναι η συνάρτηση στα σημεία. Δηλαδή, αν έχουμε μια Spline τρίτου βαθμού, η συνάρτηση αυτή αναπαρίσταται από ένα κυβικό πολυώνυμο $f(x) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$ σε κάθε διάστημα μεταξύ δύο αρχικών σημείων και έχει συνεχή πρώτη και δεύτερη παράγωγο σε αυτά. Συνήθως εφαρμόζεται σε οργανικές κινήσεις αντικειμένων όπως το περπάτημα ενός ανθρώπου ή ζώου, η τροχιά μιας μπάλας που αναπηδάει στο έδαφος, και αυτό διότι η κίνησή τους είναι καμπυλωτή χωρίς απότομες εναλλαγές κατεύθυνσης όπως στα μηχανικά αντικείμενα.

Παράδειγμα μιας τέτοιας συνάρτησης είναι το κάτωθι. Δοθέντων των σημείων σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, παράγονται πολλαπλά σημεία έτσι ώστε η καμπύλη που σχηματίζεται να είναι συνεχής και ομαλή.



Εικόνα 76 Σημεία γραμμικής παρεμβολής (α), συνεχόμενη γραμμή μέσω των σημείων spline παρεμβολής (β) στο λογισμικό Matlab.

7.2.2 Αλγόριθμοι κίνησης

Δύο είναι οι πιο διαδεδομένοι τρόποι κίνησης ενός οστού για τη δημιουργία κίνησης. Με τη χρήση εργαλείων που υλοποιούν τον αλγόριθμο του Forward Kinematics (FK) και με τη χρήση αυτών που υλοποιούν την Inverse Kinematics (IK).

Forward Kinematics -FK

Πρόκειται για απλούς μετασχηματισμούς των οστών όπως περιστροφή, μετατόπιση και μεγέθυνση. Ο animator πρέπει να θέσει αυτούς τους μετασχηματισμούς σε κάθε καρέ που χρειάζεται έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κίνηση. Ενδείκνυται για κινήσεις που δεν έχουν σοβαρούς περιορισμούς όπως ένας ρομποτικός βραχίονας διότι αυτός έχει περιορισμένο εύρος κινήσεων και με την Forward Kinematics ο καλλιτέχνης πρέπει να

εφαρμόζει μετασχηματισμούς ακριβείας σε κάθε καρτέ. Είναι κατάλληλη για αφηρημένες κινήσεις όπως το περπάτημα ενός ανθρώπου ή κάποια άλλη οργανική κίνηση. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή πολλαπλών τριγωνομετρικών τύπων, οι τελικές μετατοπίσεις, περιστροφές και μεγεθύνσεις, τα οστά έρχονται στην επιθυμητή τους κατάσταση στην χρονική στιγμή t σε συνέχεια με την προηγούμενη χρονική στιγμή.

Inverse Kinematics – IK

Ο αλγόριθμος Inverse Kinematics κάνει την κίνηση πολλαπλών οστών αρκετά πιο απλή και διαισθητική καθώς ο καλλιτέχνης εφαρμόζει τους μετασχηματισμούς σε ένα μόνο οστό με το οποίο γνωρίζει εξ αρχής τον τελικό του μετασχηματισμό-κατάσταση. Δηλαδή, δοθέντος μιας ιεραρχημένης σειράς οστών και έναν τελικό στόχο για το οστό που βρίσκεται στην ουρά της σειράς, ο αλγόριθμος αναλαμβάνει να μετασχηματίσει τα επιμέρους οστά της σειράς και το οστό στόχο έτσι ώστε να φτάσει αυτό στην τελική επιθυμητή κατάσταση. Χωρίς αυτόν τον αλγόριθμο, ο καλλιτέχνης θα έπρεπε να μετασχηματίσει κάθε ένα από τα οστά της σειράς και το οστό στόχο έτσι ώστε να επιτύχει την επιθυμητή τελική κατάστασή του.

Επίσης, ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι άλλων τεχνικών είναι η συνεισφορά της στον τομέα των βιντεοπαιχνιδιών. Για παράδειγμα, τα πόδια ενός χαρακτήρα θα έχουν θέση ακριβώς επάνω στο έδαφος ανεξαρτήτου της καμπυλότητάς του.

Συνοπτικά, η τεχνική Forward Kinematics καθορίζει την πόζα ενός σκελετού δοθέντων των γωνιών περιστροφής κάθε οστού ενώ η τεχνική Inverse Kinematics καθορίζει τις γωνίες περιστροφής κάθε οστού με δεδομένη μια πόζα του τελικού οστού στην ιεραρχία του σκελετού.

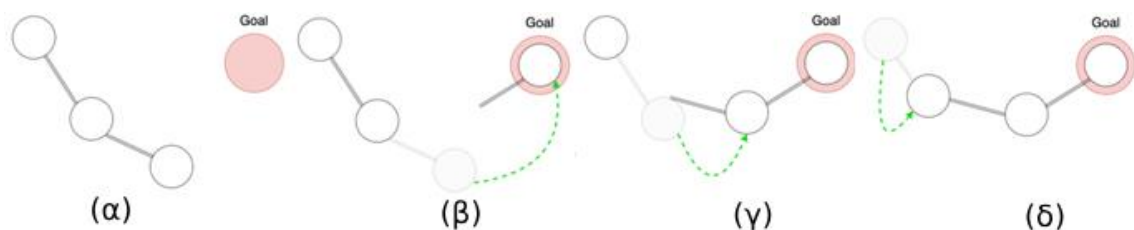
Οι Ανδρέας Αριστίδου και Joan Lasenby [71] εφηύραν τον αλγόριθμο FABRIK (Forward and Backward Reaching Inverse Kinematics) για την επίλυση του προβλήματος Inverse Kinematics. Είναι μια επαναληπτική διαδικασία με πολύ εύκολη προγραμματιστική υλοποίηση (100-200 γραμμές κώδικα) μιας και δεν χρησιμοποιεί πίνακες, γωνίες περιστροφών ή άλλα πολύπλοκα μαθηματικά, αλλά βρίσκει τη θέση κάθε οστού βρίσκοντας ένα σημείο σε μια γραμμή. Έτσι συγκλίνει σε λίγες επαναλήψεις (συνήθως 10), έχει μικρό υπολογιστικό βάρος και παράγει ρεαλιστικές κινήσεις των οστών.

Υποθέτοντας πως υπάρχει ένας τελικός στόχος Target που πρέπει να φτάσει το τελικό οστό EndEffector στην αλυσίδα των οστών, η γενική ιδέα του αλγορίθμου είναι η εξής. Όσο δεν

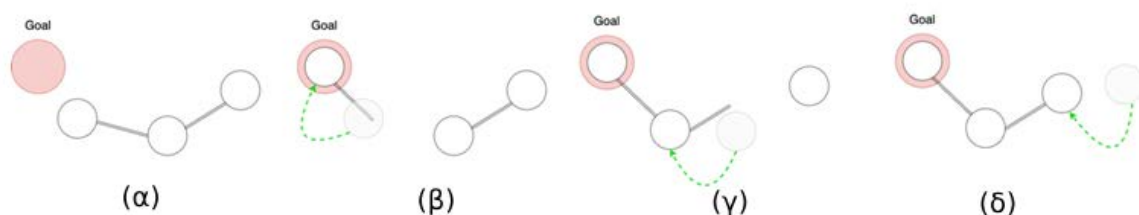
έχει το οστό EndEffector στον στόχο Target και δεν έχουμε εκτελέσει όλες τις επαναλήψεις που έχουμε θέσει να γίνουν, εκτελούμε δύο μεθόδους, την Backward (προελαύνοντας την αλυσίδα από το EndEffector μέχρι το Root και αλλάζοντας τις θέσεις των οστών με βάση το επόμενο τους οστό) και την Forward (προελαύνοντας την αλυσίδα οστών από το Root μέχρι το EndEffector αλλάζοντας τις θέσεις των οστών αντιστοίχως).

Μια επανάληψη με Backward και Forward φαίνεται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι με την διαδικασία του Backward, το EndEffector φτάνει στον στόχο αλλά το οστό Root μετακινείται από τη θέση του, και είναι κάτι ανεπιθύμητο. Για τον λόγο αυτό, εκτελούμε αμέσως μετά, μια διαδικασία Forward έτσι ώστε το οστό Root να τοποθετηθεί στην αρχική του θέση με συνέπεια το οστό EndEffector να μετακινηθεί από το οστό Target, με μικρότερη απόσταση όμως από ότι στο προηγούμενο βήμα μεταξύ του Target και EndEffector. Η διαδικασία Forward εκτελείται ακριβώς ανάποδα από την Backward θεωρώντας ως Root το EndEffector και σαν Target το παλιό Root. Έτσι, εκτελώντας αυτά τα δύο βήματα επαναληπτικά, το Root καταλήγει στην αρχική του θέση και το EndEffector πολύ κοντά στο Target (απόσταση $d < 0.05$).

Παρακάτω φαίνεται μια επανάληψη της Forward και έπειτα της Backward σε μια αλυσίδα οστών με μήκος 3.

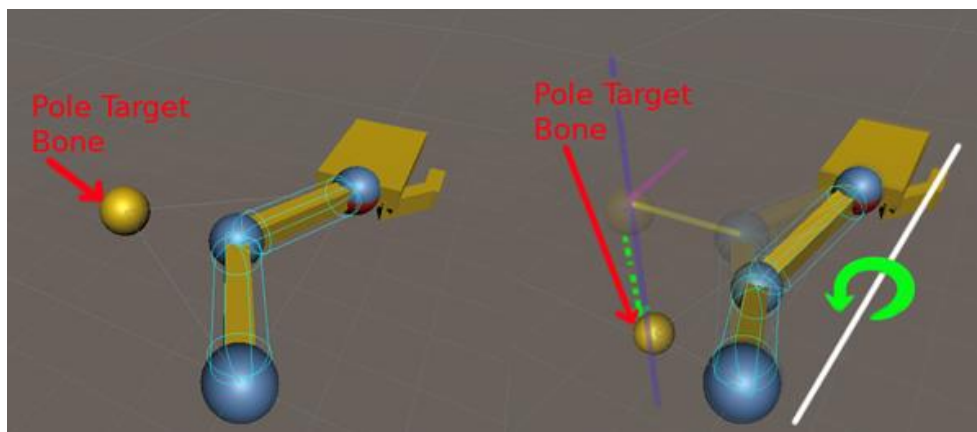


Εικόνα 77 Στιγμιότυπο επανάληψης Forward σε αλυσίδα οστών μέσω του λογισμικού draw.io



Εικόνα 78 Στιγμιότυπο επανάληψης Backward αμέσως μετά από την εφαρμογή της Forward στην ίδια αλυσίδα μέσω του λογισμικού draw.io .

Για περισσότερο έλεγχο στην περιστροφή των οστών μπορούμε να ορίσουμε ένα οστό Pole που βοηθάει στην περιστροφή του αγκώνα (αν το σύστημα IK είναι για το χέρι) ή του γονάτου (αν είναι για το πόδι) ή οποιασδήποτε αλυσίδας τριών οστών που λειτουργούν παρόμοια. Παρακάτω παρουσιάζεται η ελεγχόμενη περιστροφή του μεσαίου οστού (αγκώνα) με την μετατόπιση του οστού PoleTarget προς τα κάτω.



Εικόνα 79 Χρήση του βοηθητικού οστού PoleTarget για την ελεγχόμενη περιστροφή των οστών μέσω της πλατφόρμας Unity.

Ο ευκολότερος τρόπος υλοποίησης της αντίστροφης κινηματικής (Inverse Kinematics) είναι με τη μέθοδο CCD (Cyclic Coordinate Descent). Ο αλγόριθμος CCD προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Wang και τον Chen και είναι μια μέθοδος συνδυασμένης βελτιστοποίησης για την επίλυση του προβλήματος αντίστροφης κινηματικής των μηχανικών χειριστών [72].

Η Κατάβαση Συντεταγμένων είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης που ελαχιστοποιεί διαδοχικά κατά μήκος των οδηγιών συντεταγμένων για να βρει το ελάχιστο μιας συνάρτησης.

Σε κάθε επανάληψη, ο αλγόριθμος καθορίζει ένα μπλοκ συντεταγμένων ή συντεταγμένων μέσω ενός κανόνα επιλογής συντεταγμένων, και στη συνέχεια ελαχιστοποιεί ακριβώς ή ανακριβώς το αντίστοιχο επίπεδο συντεταγμένων ενώ διορθώνει όλες τις άλλες συντεταγμένες ή μπλοκ συντεταγμένων.

Μια αναζήτηση γραμμής κατά μήκος της κατεύθυνσης συντεταγμένων μπορεί να πραγματοποιηθεί στο τρέχον επαναληπτικό για να προσδιοριστεί το κατάλληλο μέγεθος βήματος. Η Καταγωγή Συντεταγμένων ισχύει τόσο σε διαφοροποιήσιμα όσο και χωρίς παράγωγα περιβάλλοντα.

Στην περίπτωση Καθόδου Κυκλικής Συντεταγμένης, ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει κυκλικά τις διαστάσεις, μία κάθε φορά, ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση σε σχέση με κάθε κατεύθυνση συντεταγμένων κάθε φορά. Δηλαδή, ξεκινώντας με αρχικές μεταβλητές τιμές $x^0 = x_1^0, \dots, x_n^0$, βρίσκουμε το x^{k+1} από το x^k επιλύοντας επαναληπτικά τα προβλήματα βελτιστοποίησης μιας μεταβλητής

$$x_i^{k+1} = \operatorname{argmin}_f(x_1^{k+1}, \dots, x_{i-1}^{k+1}, y, x_{i+1}^k, \dots, x_n^k)$$

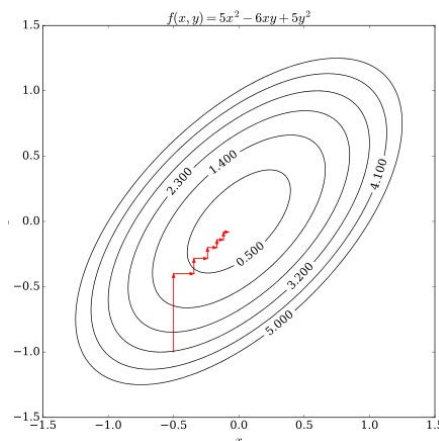
για κάθε μεταβλητή x_i , για i από 1 μέχρι n .

Έτσι ξεκινώντας από μια αρχική τυχαία τιμή x^0 για ένα τοπικό ελάχιστο της F , παίρνοντας μια αλληλουχία x^0, x^1, x^2 διαδοχικά.

Κάνοντας μια Αναζήτηση Γραμμής (Line Search) σε κάθε επανάληψη, έχουμε τα εξής

$$F(x^0) \geq F(x^1) \geq F(x^2) \geq \dots$$

Δεν παρουσιάζεται κάποια βελτίωση μετά από έναν κύκλο αναζήτησης γραμμής κατά μήκος των κατευθύνσεων συντεταγμένων. Επομένως, έχει επιτευχθεί η σύγκλιση προς ένα ακίνητο σημείο. Η διαδικασία παρουσιάζεται κάτωθι.



Εικόνα 80 Διαδικασία σύγκλισης με τη μέθοδο CCD [73].

7.3 Μέθοδοι εφαρμογής κίνησης

Η κίνηση χαρακτήρων και μοντέλων γινόταν με δύο τεχνικές. Με την παλιά (keyframing-method) στην οποία ο χρήστης μετατοπίζει και περιστρέφει κάθε οστό καρέ-καρέ και με την καινούργια (motion capture) στην οποία ο χρήστης φοράει συγκεκριμένους αισθητήρες στις αρθρώσεις του και πραγματοποιεί τις κινήσεις που θέλει για τον χαρακτήρα του. Αυτές οι κινήσεις καταγράφονται με κάμερα, και έπειτα εφαρμόζονται στον σκελετό αφού καθαριστούν από ανούσιες κινήσεις.

7.3.1 Motion Capture

Αρκετά διαδεδομένη σήμερα είναι η τεχνική του Motion Capture (MoCap). Η αποτύπωση της κίνησης είναι η διαδικασία ψηφιακής παρακολούθησης και επανακωδικοποίησης των κινήσεων αντικειμένων ή ζωντανών όντων στον τρισδιάστατο χώρο. Όπως έχουν αναφέρει οι Menolotto et al. (2020) [74] έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνολογίες και τεχνικές για την καταγραφή της κίνησης. Τα συστήματα που βασίζονται σε κάμερες υπερύθρων (IR), για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον τριγωνισμό της θέσης των αντανакλαστικών σφαιρικών και άκαμπτων σωμάτων που είναι προσαρτημένα στο αντικείμενο στόχου προς παρακολούθηση. Οι ευαίσθητες στο βάθος (depth aware) κάμερες, προβάλλουν φως σε ένα αντικείμενο, υπολογίζοντας το βάθος με βάση τη χρονική καθυστέρηση από την εκπομπή φωτός έως την ανίχνευση της ανάκλασης του φωτός από τα σφαιρικά αντικείμενα. Η έρευνα έχει επίσης επικεντρωθεί στον χειρισμό και την επεξεργασία συνόλων δεδομένων υψηλών διαστάσεων με ένα ευρύ φάσμα τεχνικών ανάλυσης, όπως η μηχανική μάθηση, τα φίλτρα Kalman, η ιεραρχική ομαδοποίηση και άλλα.

Αυτά τα σφαιρικά σωματίδια δρουν ως αρθρώσεις στα κόκαλα του ανθρώπου που τις φοράει σαν στολή. Έτσι η κάμερα αποτυπώνει στιγμιότυπα του ανθρώπου που κινείται χωρίς τον ίδιο παρά μόνο αυτές τις αρθρώσεις. Στην συνέχεια, με τη χρήση αλγορίθμου τριγωνοποίησης, οι συντεταγμένες κάθε σφαιριδίου στον δισδιάστατο χώρο μετατρέπονται σε τρισδιάστατες. Οι αρθρώσεις αυτές μοντελοποιούνται σε ένα σύστημα 3D συντεταγμένων με αποτέλεσμα την εξαγωγή μιας κίνησης που αργότερα μπορεί να εισαχθεί σε κάποιο βιντεοπαιχνίδι ή σε κάποια ταινία. Χρησιμοποιήθηκε σε διάσημα βιντεοπαιχνίδια όπως στο Assassin's Creed και στο Pro Evolution και στην ταινία Avatar.

Σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι παραγόμενες κινήσεις είναι ρεαλιστικές αφού παράγονται από πραγματικές κινήσεις ανθρώπων. Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι τα λάθη που προκύπτουν από τον αλγόριθμο μετατροπής και η διόρθωση αυτών μέσω του σχεδιαστή - animator.

Παρακάτω εμφανίζονται οι στολές αυτής της τεχνικής που πρέπει να φορούν οι ηθοποιοί με τις χαρακτηριστικές άσπρες σφαίρες που αποτυπώνονται σε ειδικές κάμερες.



Εικόνα 81 Οι αξιοσημείωτοι ηθοποιοί, Laura Bailey και Richard McGonagle, στα γυρίσματα του *Uncharted 4: A Thief's End* [75].

Λόγω της επαναχρησιμοποίησης απλών και καθημερινών κινήσεων όπως το περπάτημα ή ο χορός της νίκης σε πολλά βιντεοπαιχνίδια, θα ήταν αντιπαραγωγικό να μην χρησιμοποιούνταν ήδη υπάρχουσες κινήσεις και να δημιουργούνταν εξ ολοκλήρου από την αρχή. Αυτό το πρόβλημα έλυσε για πολλούς σχεδιαστές κινήσεων η ιστοσελίδα της Mixamo. Πρόκειται περί online βιβλιοθήκης κινήσεων αλλά και αυτόματης σκελετοποίησης. Συγκεκριμένα, ο χρήστης ανεβάζει ένα δικό του μοντέλο ή χρησιμοποιεί από τα υπάρχοντα της ιστοσελίδας. Για την περίπτωση του δικού του μοντέλου, είναι απαραίτητο να θέσει κάποια σημεία όπως πού βρίσκεται ο αγκώνας, ο καρπός, το πηγούνι και το γόνατο και η ιστοσελίδα θα υπολογίσει έναν σκελετό για το μοντέλο. Στη συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει όποια κίνηση επιθυμεί από τη λίστα και να την κατεβάσει για άμεση χρήση, ή για βοήθεια χρησιμοποιώντας την εκάστοτε κίνηση σαν βάση για μια πιο περίπλοκη.

7.3.2 Παραμετρικό σύστημα κίνησης

Οι ερευνητές Bhatti et al. (2013) [76], βλέποντας πως οι κυριότερες μέθοδοι κίνησης είναι χρονοβόρες και δαπανηρές, ανέπτυξαν ένα σύστημα κίνησης τετράποδων μοντέλων με απλές τριγωνομετρικές μαθηματικές εκφράσεις.

Για παράδειγμα,

- Αν θέλουμε να κινήσουμε τη σπονδυλική στήλη ενός ζώου, θα εισάγουμε στο σύστημα τη μαθηματική έκφραση:

$$SpineSwingS_{sw} = \sin(tf \cdot M_{freq} \cdot C_{error}) \cdot M_{osc}$$

- Ενώ αν θέλουμε να κινήσουμε το στέρνο του:

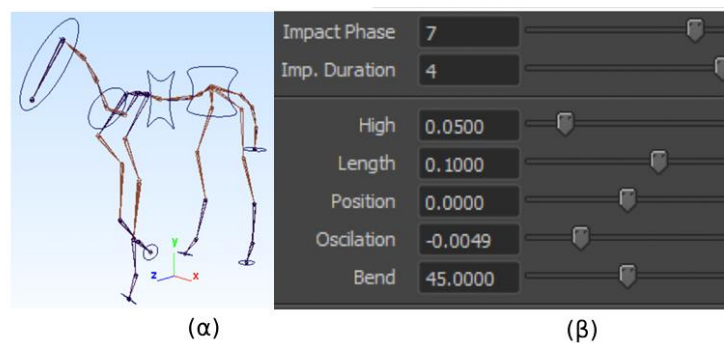
$$LegSternum.tZ = \cos\left(tf \cdot Mfreq - \left(\frac{\pi}{4}\right)\right) \cdot L_{osc} \cdot C_{error} + J_{error}$$

A. Για το πόδι του:

$$LegSwing(L_{swa}) = \frac{P_{ld} - 2 \cdot \pi \cdot FPS + L_{cycle} - L_{rp}}{L_{cycle}}$$

Κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι είναι εξαιρετικά παραμετροποιήσιμο με κώδικα προγραμματισμού μεγιστοποιώντας την ευελιξία και την ανεξαρτησία που έχει ένας προγραμματιστής χωρίς να βασίζεται εξ ολοκλήρου στον σχεδιαστή κίνησης. Με αυτόν τον τρόπο, το παιχνίδι γίνεται πιο ενδιαφέρον αφού οι κινήσεις έχουν την δυνατότητα, κάθε φορά, να είναι διαφορετικές μεταξύ τους.

Παρακάτω φαίνεται ο σκελετός ενός αλόγου και οι δυνατότητες παραμετροποίησης της κίνησής του μέσω ολισθητών σε περιβάλλον διεπαφής χρήστη (User Interface Sliders).



Εικόνα 82 Σκελετός αλόγου (α) και ολισθητές Διεπαφής Χρήστη για την κίνηση του αριστερού ποδιού (β) [76].

7.3.3 Εξαγωγή κίνησης από βίντεο

Μια καινοτομία που εξελίσσεται τα τελευταία χρόνια είναι η εξαγωγή κινήσεων και σκελετών για ανθρώπινα μοντέλα από βίντεο. Πρόκειται για μια τεχνική τύπου motion capture χωρίς όμως τον εξοπλισμό που απαιτείται. Μοναδικό συστατικό για την εξαγωγή κίνησης είναι ένα βίντεο που να απεικονίζει την επιθυμητή κίνηση.

Αυτήν την τεχνολογία χρησιμοποιεί η εταιρεία DeepMotion παρέχοντας δωρεάν μέσω διαδικτυακού περιηγητή (browser). Σύμφωνα με την υπηρεσία Animate 3D, ο χρήστης μεταφορτώνει σε ένα βίντεο την κίνηση που επιθυμεί και αποκτά μια 3D κίνηση με σκελετό που μπορεί να χρησιμοποιήσει σε βιντεοπαιχνίδια, εικονική πραγματικότητα,

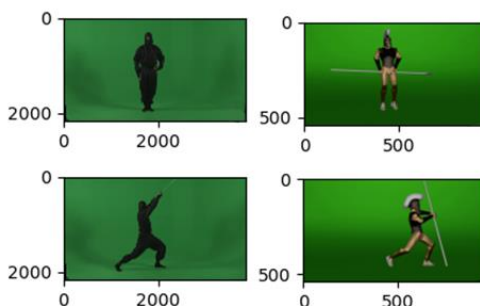
ανάλυση για σπορ και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Μέσω παρακολούθησης προσώπου και χεριών (face & hand tracking), κράτησης των ποδιών στο έδαφος (foot locking), προσομοίωσης με φυσικούς νόμους (physics simulation), ο χρήστης έχει περισσότερο έλεγχο και ελαστικότητα στη δημιουργία υψηλής ποιότητας κινήσεων.

Σύμφωνα με τους προγραμματιστές της εταιρείας, το νευρωνικό δίκτυο που καθορίζει τις κινήσεις, έχει εκπαιδευτεί όπως εκπαιδεύεται ένας ανθρώπινος εγκέφαλος σε μικρή ηλικία. Μέσω της εφαρμογής φυσικών νόμων (physics based simulation), η κίνηση μπορεί να διακοπεί με συνέπεια το νευρωνικό δίκτυο να χρειαστεί να βρει την ισορροπία μέσω δευτερευόντων κινήσεων, όπως ακριβώς θα έκανε ένας άνθρωπος. Το γεγονός αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των παλιών τυποποιημένων κινήσεων παιχνιδιών συμβατικής τεχνολογίας κινήσεων βελτιώνοντας τη διαδραστικότητα των παιχνιδιών.

Παρακάτω απεικονίζεται ένα στιγμιότυπο ενός βίντεο από κάποιον άνθρωπο που εκτελεί μια πολεμική κίνηση του αθλήματος MMA, και η παραγόμενη πόζα ενός μοντέλου με την υπηρεσία Animate 3D. Έπειτα απεικονίζονται 2 καρτέ από βίντεο με έναν νίντζα στα αριστερά και το εξαγόμενο τρισδιάστατο μοντέλο του χρήστη με τις κινήσεις του νίντζα εφαρμοσμένες στα δεξιά.



Εικόνα 83 Εξαγωγή κίνησης από βίντεο μέσω της υπηρεσίας Animate3D της εταιρείας DeepMotion.



Εικόνα 84 Μετατροπή των καρτέ του βίντεο σε πόζες ενός τρισδιάστατου μοντέλου του χρήστη μέσω της Deep Motion – Animate3d.

Κεφάλαιο 8 Υλοποίηση Χαρακτήρα

8.1 Εισαγωγή

Ο στόχος της παρούσης εργασίας είναι να δημιουργηθεί ένα μοντέλο του Αχιλλέα από την Ελληνική Ιστορία, και ένα μικρό παιχνίδι (demo) στην πλατφόρμα της Unity όπου ο χαρακτήρας θα κινείται στον χώρο και θα εκτελεί πολεμικές κινήσεις, αφού εξοπλιστεί με τα κατάλληλα όπλα.

Στα επόμενα υποκεφάλαια, θα αναφερθούν οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε στάδιο δημιουργίας του χαρακτήρα.

8.2 Εικόνες αναφοράς

Στο αρχικό στάδιο δημιουργίας του χαρακτήρα είναι απαραίτητο να συγκεντρωθούν κάποιες εικόνες με στοιχεία του χαρακτήρα (reference images) που θα βοηθήσουν τον σχεδιαστή/μοντελιστή να αποκτήσει πληρέστερη εικόνα του χαρακτήρα όσον αφορά την ανατομία του, τις διαστάσεις του, την αρχική του πόζα, την ενδυμασία και τον εξοπλισμό του και γενικότερα τη σχεδιάσή του. Έτσι, ο σχεδιαστής έχει κάποιον οδηγό ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικό το τελικό αποτέλεσμα.

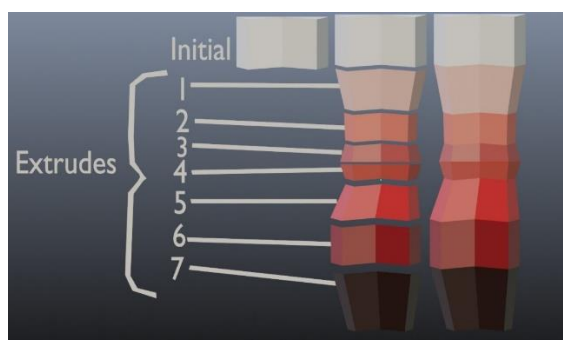
Παρακάτω είναι μερικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση του χαρακτήρα του Αχιλλέα.



Εικόνα 85 Εικόνες αναφοράς για την ανατομία του σώματος [77][78][79] .

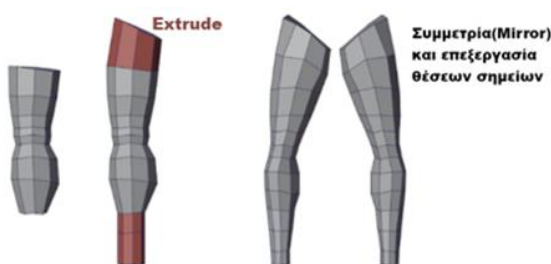
8.3 Μοντελισμός

Εάν θέλαμε να δημιουργήσουμε ένα πόδι με λίγα πολύγωνα, θα ξεκινούσαμε από κάτι απλό και με διαδοχικά face extrudes στη βάση του κάθε καινούργιου extrude, θα καταλήγαμε σε αυτό το αποτέλεσμα που δείχνει η φωτογραφία (κωδικοποιημένη σε χρώμα, κάθε χρώμα είναι και ένα νέο face extrude).



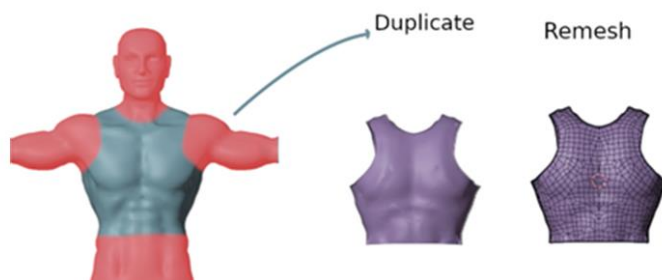
Εικόνα 86 Διαδοχικά face extrudes για τη δημιουργία ποδιού μέσω του λογισμικού Blender.

Έτσι, πραγματοποιώντας μερικά ακόμη extrudes και εφαρμόζοντας συμμετρία προς τον x άξονα έχουμε δύο πόδια με λίγα πολύγωνα τα οποία θα αποτελέσουν μια καλή βάση για εισαγωγή ρεαλιστικών λεπτομερειών. Την προσθήκη λεπτομερειών θα τη δούμε παρακάτω.



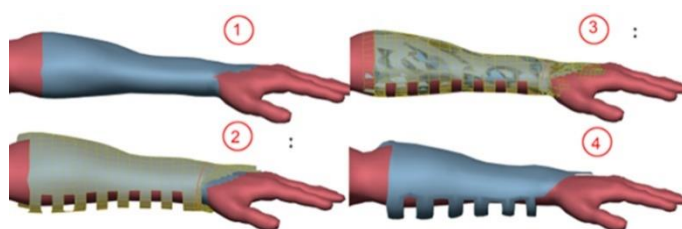
Εικόνα 87 Μοντελοποίηση ποδιών μέσω του λογισμικού Blender

Για να φτιαχτεί ο θώρακας της πανοπλίας δίχως να ξεκινήσουμε από την αρχή να φτιάξουμε το μοντέλο, μπορούμε να αντιγράψουμε ένα υποσύνολο του σώματος από τον θώρακα. Έπειτα με τον αλγόριθμο του Remesh και κάποια επεξεργασία στα άκρα για να είναι οι γραμμές ευθείες και ομαλές καμπύλες, έχουμε σαν αποτέλεσμα έναν θώρακα της πανοπλίας που θα φοράει ο χαρακτήρας.



Εικόνα 88 Μοντελοποίηση του θώρακα μέσω του λογισμικού Blender

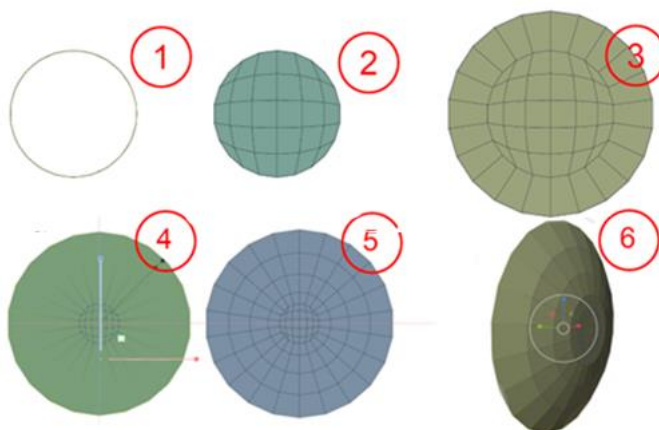
Στην περίπτωση ενός περιβραχιονίου, εφαρμόζουμε την παραπάνω διαδικασία. Αντιγράφουμε κομμάτι του χεριού και εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο remesh με κάποια επιπρόσθετη επεξεργασία των σημείων για το τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 89 Μοντελοποίηση περιβραχιονίου μέσω του λογισμικού Blender

Για την ασπίδα ακολουθούμε τα εξής:

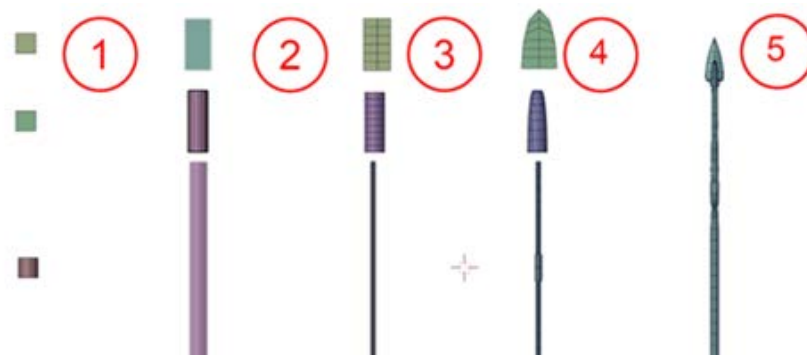
1. Εισάγουμε έναν κύκλο από το μενού πατώντας *Shift+A*→*Mesh*→*Circle* του blender
2. Ενώνουμε το εσωτερικό του με τη λειτουργία *Grid Fill*.
3. Εφαρμόζουμε τη λειτουργία *Extrude* στις εξωτερικές ακμές.
4. Μεγεθύνουμε αυτές τις ακμές προς τα έξω.
5. Εισάγουμε νέες ακμές με τη λειτουργία *Insert Edge Loop* πατώντας *Shift+R*.
6. Επεξεργαζόμαστε τις θέσεις των σημείων έτσι ώστε να είναι πιο καμπυλωτή η ασπίδα μας.



Εικόνα 90 Μοντελοποίηση της ασπίδας μέσω του λογισμικού Blender.

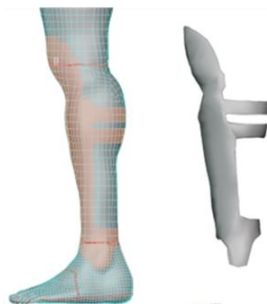
Για τη μοντελοποίηση του δόρατος χρειάστηκαν τρία αντικείμενα. Για να φτιαχτούν ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

1. Εισαγωγή κυλίνδρων
2. Μεγέθυνση αυτών όπως φαίνεται στο στιγμιότυπο 2 της παρακάτω εικόνας.
3. Εισαγωγή ακμών-edge loops.
4. Εξώθηση των όψεων (extrude) κάποιων εδρών και τροποποίηση θέσεων σημείων.
5. Συνένωση και των τριών κυλίνδρων και τοποθέτηση στη σωστή τους θέση για να μοιάζει με δόρυ.



Εικόνα 91 Μοντελοποίηση δόρατος μέσω του λογισμικού Blender.

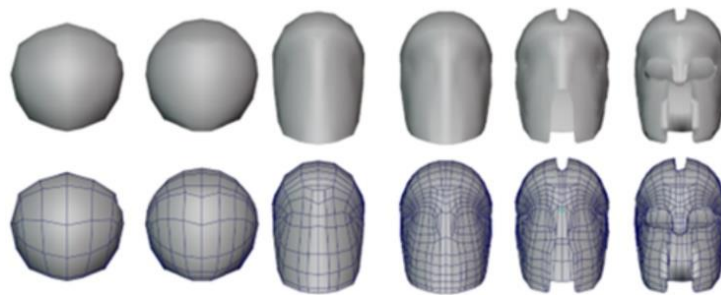
Παρόμοια τεχνική ακολουθήθηκε και στα υπόλοιπα κομμάτια της πανοπλίας όπως οι περικνημίδες.



Εικόνα 92 Μοντελοποίηση περικνημίδας μέσω του λογισμικού Blender.

Για την περικεφαλαία ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Ξεκίνησε ως απλό σφαιροειδές αντικείμενο με λίγα πολύγωνα
- Προστέθηκαν μερικές ακμές-edge loops
- Μετακινήθηκαν καταλλήλως οι κορυφές ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό σχήμα



Εικόνα 93 Μοντελοποίηση περικεφαλαίας μέσω του λογισμικού Blender.

8.4 Γλυπτική

Για τη δημιουργία του βασικού σχήματος μερικών μερών του σώματος αλλά και για την προσθήκη λεπτομερειών στο σώμα χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή γλυπτική. Αρχικά, δημιουργήθηκε το βασικό σχήμα του σώματος με απλά σχήματα όπως σφαίρες. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε μια συνένωση όλων αυτών των απλών σχημάτων σε ένα πλέγμα με τη λειτουργία *Join* του Blender. Έπειτα ακολουθεί η προσθήκη περισσότερων λεπτομερειών σταδιακά σε στοιβάδες (layers), έτσι ώστε αν γίνει κάποιο λάθος, να υπάρχει η προηγούμενη έκδοση.



Εικόνα 94 Δημιουργία βασικού σχήματος σώματος μέσω απλών σφαιρών μέσω του λογισμικού Blender

Το επόμενο και πιο χρονοβόρο κομμάτι-βήμα είναι η προσθήκη λεπτομερειών με διάφορες βούρτσες γλυπτικής μέχρι να καταστεί το μοντέλο μας ρεαλιστικό.

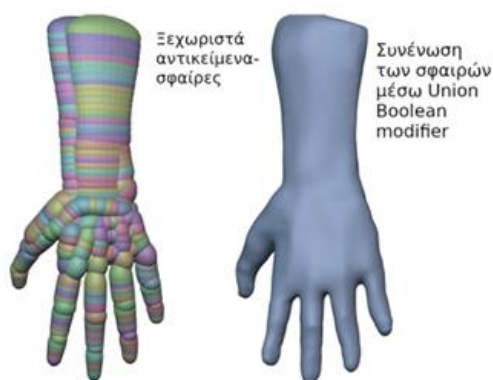


Εικόνα 95 Εισαγωγή λεπτομερειών στο άνω σώμα για ρεαλιστικούς μύες μέσω του λογισμικού Blender

Με την ίδια τεχνική, δηλαδή τη δημιουργία βασικών σχημάτων και τη συνένωσή τους μέσω Join ή Boolean και Remesh για την επαναπροσδιορίση της τοπολογίας τους, έγιναν οι πατούσες και οι παλάμες.



Εικόνα 96 Σχεδιασμός πατούσας μέσω του λογισμικού Blender.



Εικόνα 97 Σχεδιασμός παλάμης χεριού μέσω του λογισμικού Blender.

Για τα πόδια, χρησιμοποιήθηκε το αρχικό μοντέλο ποδιών που σχεδιάστηκε στο στάδιο του μοντελισμού και στη συνέχεια προστέθηκαν ρεαλιστικές λεπτομέρειες.



Εικόνα 98 Σχεδιασμός ποδιών μέσω του λογισμικού Blender.

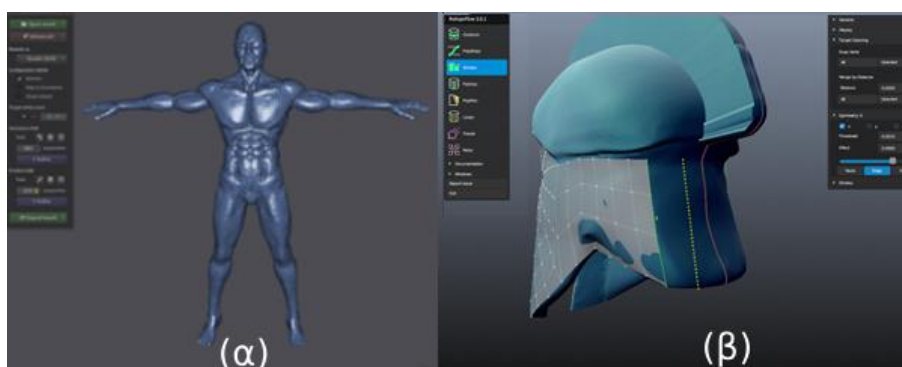
Για το κεφάλι, δεν εφαρμόζεται η προηγούμενη τεχνική με τα απλά σχήματα αλλά ξεκινώντας από μια σφαίρα, με γνώμονα διάφορες εικόνες πραγματικών προσώπων, με την εφαρμογή πολλαπλών πινελιών της ψηφιακής γλυπτικής χτίζεται ένα ρεαλιστικό πρόσωπο για τον χαρακτήρα μας.



Εικόνα 99 Σχεδιασμός κεφαλίου και προσώπου μέσω του λογισμικού Blender.

8.4.1 Remesh

Για τη μεταφορά των λεπτομερειών από την γλυπτική στο τελικό μας μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Instant Meshes καθώς και remeshing με το χέρι με εργαλεία του Blender σε μέρη όπως η περικεφαλαία.



Εικόνα 100 Μεταφορά λεπτομερειών μέσω Remeshing με το πρόγραμμα Instant Meshes (α) και με εργαλεία του Blender (β).

8.5 Κίνηση

8.5.1 Rigging

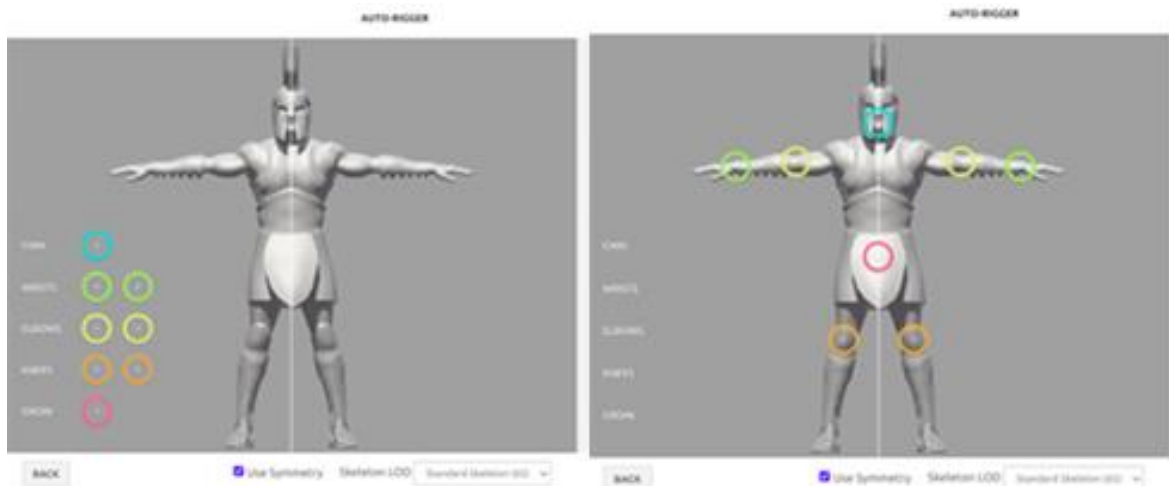
Για τη δημιουργία του σκελετού και την κίνηση του χαρακτήρα μας, χρησιμοποιήθηκε η εξωτερική βιβλιοθήκη κινήσεων της mixamo.com έτσι ώστε να έχουμε μια αρχική βάση ρεαλιστικών κινήσεων, και με βάση αυτήν, να αλλαχθούν περεταίρω οι κινήσεις έτσι ώστε να ταιριάζουν σε έναν χαρακτήρα που κρατάει ασπίδα και σπαθί.

Η ιστοσελίδα αυτή διαθέτει μια πλούσια βιβλιοθήκη κινήσεων δωρεάν για χαρακτήρες βιντεοπαιχνιδιών. Δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη της να ανεβάσει ένα μοντέλο του και με κάποιες ρυθμίσεις να το κατεβάσει έτοιμο, με τις κινήσεις που διάλεξε ο χρήστης ενσωματωμένες σε αυτό. Στη συνέχεια, γίνανε μετατροπές στο blender και στο unity στις θέσεις των χεριών έτσι ώστε να φαίνεται πως κρατάει την ασπίδα και το σπαθί ρεαλιστικά.

Ο χρήστης πρέπει να προσδιορίσει τις κλειδώσεις του σκελετού μετακινώντας τους πολύχρωμους κύκλους σε αυτές.

Συγκεκριμένα πρέπει να μετακινήσει:

1. Τον μπλε κύκλο στο πηγούνι
2. Τον πράσινο κύκλο στον καρπό
3. Τον κίτρινο κύκλο στον αγκώνα
4. Τον πορτοκαλί κύκλο στο γόνατο
5. Τον μωβ κύκλο στην λεκάνη των ποδιών



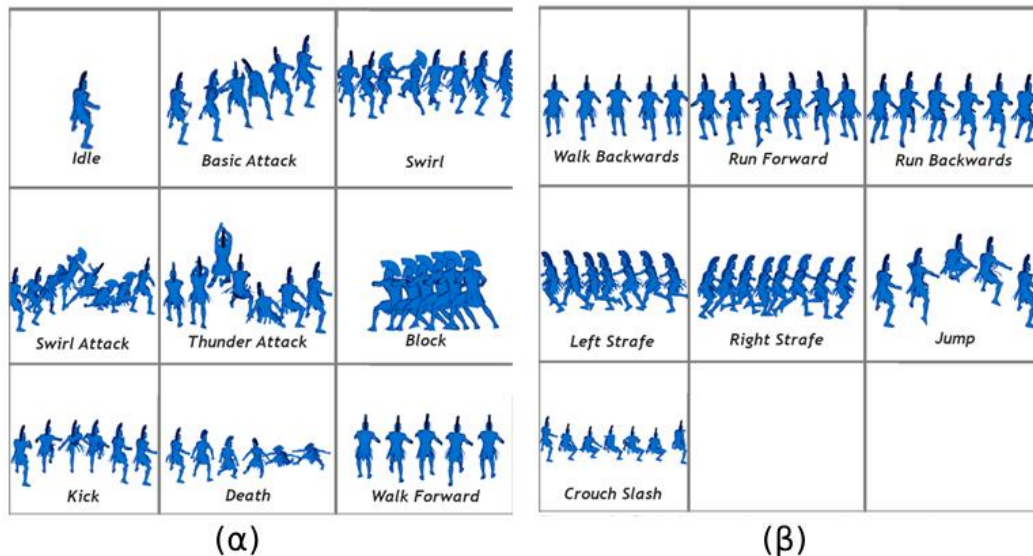
Εικόνα 101 Διαδικασία Rigging μέσω του προγράμματος της Mixamo.

8.5.2 Animation

Με επεξεργασία των κινήσεων σε κάθε καρτέ έτσι ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα, καταλήγουμε σε ένα μοντέλο με σκελετό που έχει τις εξής κινήσεις ενσωματωμένες.

- Idle (Αδράνεια)
- Basic Attack (Βασική Επίθεση)
- Swirl (Στριφογύρισμα Επίθεσης)
- Swirl Attack (Στριφογύρισμα Επίθεσης 2)
- Thunder Attack (Χτύπημα από ψηλά σαν κεραυνός)
- Block (Εμπόδιση εχθρικού χτυπήματος-Άμυνα)
- Kick (Λάκτισμα-Κλωτσιά)
- Death (Θάνατος)
- Walk Forward (Περπάτημα προς τα εμπρός)
- Walk Backward (Οπισθοχώρηση)
- Run Forward (Τρέξιμο προς τα εμπρός)

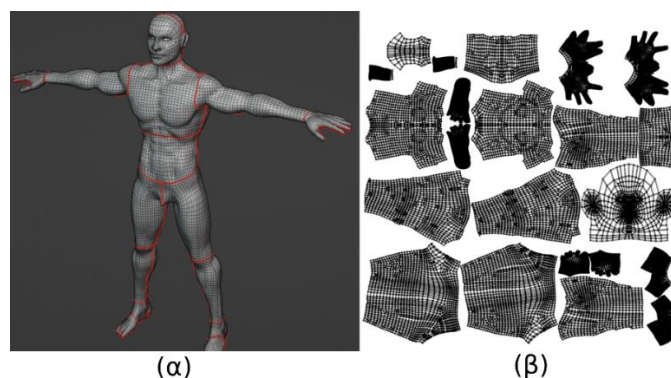
- Run Backward (Τρέξιμο προς τα πίσω)
- Left Strafe (Τρέξιμο πλαγίως προς τα αριστερά)
- Right Strafe (Τρέξιμο πλαγίως προς τα δεξιά)
- Jump (Άλμα)
- Crouch Slash (Σκύψιμο και χτύπημα)



Εικόνα 102 Σύνολο κινήσεων που δύναται να εκτελέσει ο χαρακτήρας μας με το λογισμικό Blender.

8.6 Texturing

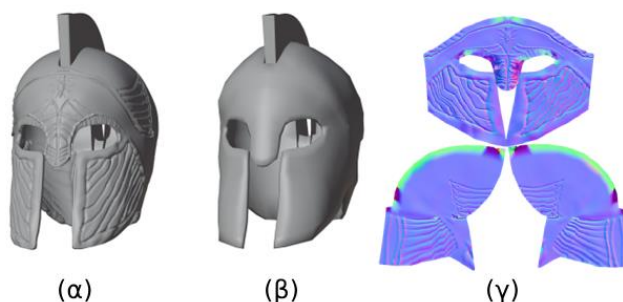
Για την χαρτογράφηση του σώματος μοντέλου, δηλαδή το στάδιο του UV Layout, τοποθετήθηκαν ραφές (UV Seams) στα κατάλληλα σημεία, ενώ για μέρη της πανοπλίας χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία Smart UV project του Blender, που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο του Flat Based Angle.



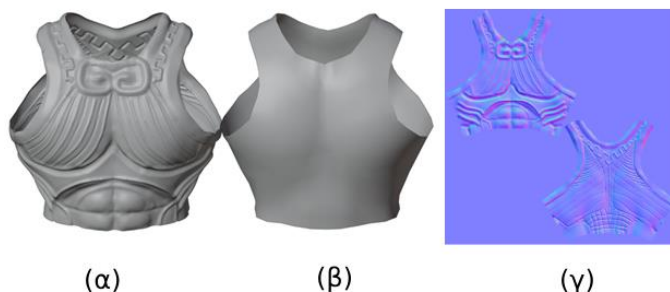
Εικόνα 103 UV Seams του σώματος που απεικονίζονται με κόκκινες γραμμές (α), UV χαρτογράφηση των κορυφών (β) μέσα στο λογισμικό Blender.

Για τη μεταφορά λεπτομερειών από το μοντέλο γλυπτικής στο μοντέλο με τα λιγότερα πολύγωνα χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία Bake του Blender.

Παρακάτω εμφανίζεται το μοντέλο της περικεφαλαίας από την γλυπτική και το μοντέλο που θα εισαχθεί στο παιχνίδι. Για να μεταφερθούν οι λεπτομέρειες του πρώτου μοντέλου στο δεύτερο, τα κάθετα διανύσματα αποτυπώθηκαν σε μια εικόνα (Normal Map) με τη χρήση του Normal Baking του Blender. Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε για τον θώρακα καθώς και για όλα τα μέρη που πέρασαν από το στάδιο της γλυπτικής



Εικόνα 104 Μεταφοράς λεπτομέρειας από το μοντέλο μεγάλου αριθμού πολυγώνων (α) στο χαμηλού αριθμού (β) μέσω Normal Map Bake (γ) για την περικεφαλαία μέσω του λογισμικού Blender .



Εικόνα 105 Μεταφοράς λεπτομέρειας από το μοντέλο μεγάλου αριθμού πολυγώνων (α) στο χαμηλού αριθμού (β) μέσω Normal Map Bake (γ) για την πανοπλία μέσω του λογισμικού Blender.

Για τη δημιουργία χρωμάτων του μοντέλου εφαρμόστηκαν χειροκίνητες πινελιές μέσω των εργαλείων Texture Paint που παρέχει το Blender καθώς και μέσω του Node System για τη δημιουργία μεταλλικών και άλλων υφών της πανοπλίας.



Εικόνα 106 Δημιουργία υφής και χρωμάτων δέρματος μέσω Texture Painting μέσω Blender.

Το τελικό αποτέλεσμα της δημιουργίας του Αχιλλέα χωρίς ή με την ασπίδα και το δόρυ, τις υφές χρωμάτων και τα υλικά, καθώς και τον φωτισμό της σκηνής της Unity εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα.

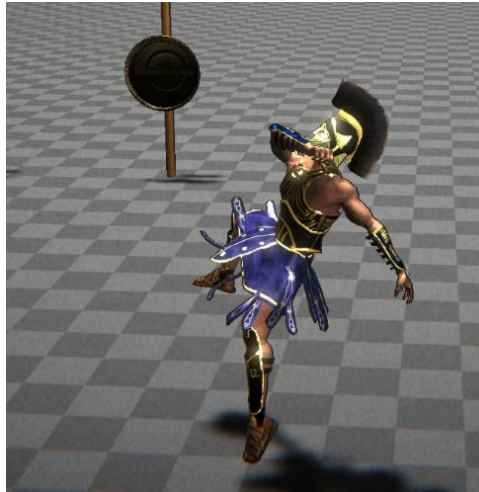


Εικόνα 107 Τελικό αποτέλεσμα της δημιουργίας του χαρακτήρα του Αχιλλέα χωρίς δόρυ και ασπίδα (αριστερά), με δόρυ και ασπίδα (δεξιά) στην πλατφόρμα Unity.

8.7 Unity

Σκοπός αυτού του demo είναι η ανάδειξη του μοντέλου του Αχιλλέα και των κινήσεών του. Μέσα σε αυτό, ο χαρακτήρας θα έχει τη δυνατότητα να κινείται στον χώρο, να εκτελεί έναν αριθμό από πολεμικές κινήσεις, όπως επίθεση ακοντίου σε διάφορες παραλλαγές, άλμα, άμυνα και κλωτσιά. Επίσης, θα μπορεί να παραλάβει το ακόντιο και την ασπίδα όταν βρίσκονται στη σωστή θέση, δηλαδή μπροστά στο ακόντιο και την ασπίδα που είναι κρεμασμένη σε στύλους. Για να έχει αυτή τη δυνατότητα ο χαρακτήρας μας, θα χρειαστεί

να χρησιμοποιήσουμε μια προγραμματιστική διαδικασία που υλοποιεί τον αλγόριθμο Inverse Kinematics, καθώς δεν υπάρχει κάποια προκαθορισμένη κίνηση αρπαγής ακοντίου και ασπίδας. Για τον λόγο αυτόν υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος FABRIK [71] σε έναν κώδικα σε γλώσσα C# περίπου 200 γραμμών στην πλατφόρμα της Unity. Όταν ο χαρακτήρας βρεθεί στη σωστή θέση, ο παίκτης θα πρέπει να πατήσει το πλήκτρο αρπαγής.



Εικόνα 108 Πολεμική κίνηση Αχιλλέα στην πλατφόρμα Unity.

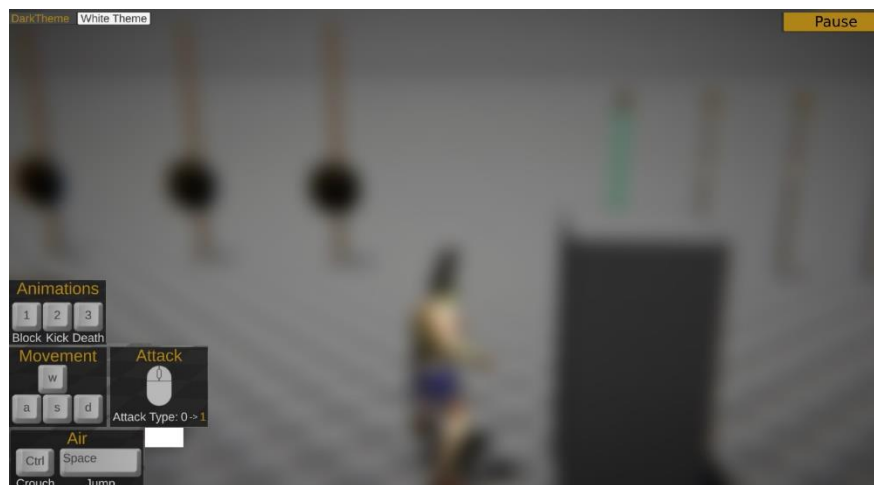


Εικόνα 109 Αρπαγή του ακοντίου με τη χρήση του αλγορίθμου FABRIK Inverse Kinematics στην πλατφόρμα Unity.

Ως μηχανή παιχνιδιών (Game Engine) που θα υποστηρίξει το demo αναδεικνύοντας τις παραπάνω ενέργειες, επιλέχθηκε η Unity, διότι προσφέρει ευελιξία για την περεταίρω ανάπτυξη ενός demo και διευκολύνει τη μετατροπή του σε ολοκληρωμένο παιχνίδι με μια πληθώρα από προγραμματιστικά και γραφικά εργαλεία που διαθέτει όπως και το κατάστημά (Asset Store) της.

Η εμπειρία του χρήστη (UX – User Experience) είναι η τέχνη σχεδιασμού ενός προϊόντος όπως ένα βιντεοπαιχνίδι, έτσι ώστε η αλληλεπίδραση με αυτό να είναι όσο το δυνατόν ευκολότερη και απολαυστικότερη. Για τον λόγο αυτόν είναι απαραίτητη η δημιουργία της διεπαφής χρήστη (UI – User Interface), η οποία είναι ευκολόχρηστη και ευανάγνωστη προς τον τελικό χρήστη. Τα επιμέρους στοιχεία, όπως κείμενα επεξήγησης, οι λειτουργίες του κάθε πλήκτρου που επεξηγεί την κίνηση που θα εκτελέσει ο χαρακτήρας μας και το μενού παύσης, πρέπει να είναι με τέτοιον τρόπον τοποθετημένα ώστε να παρέχουν στον χρήστη χρήσιμες οδηγίες για την χρήση του παιχνιδιού.

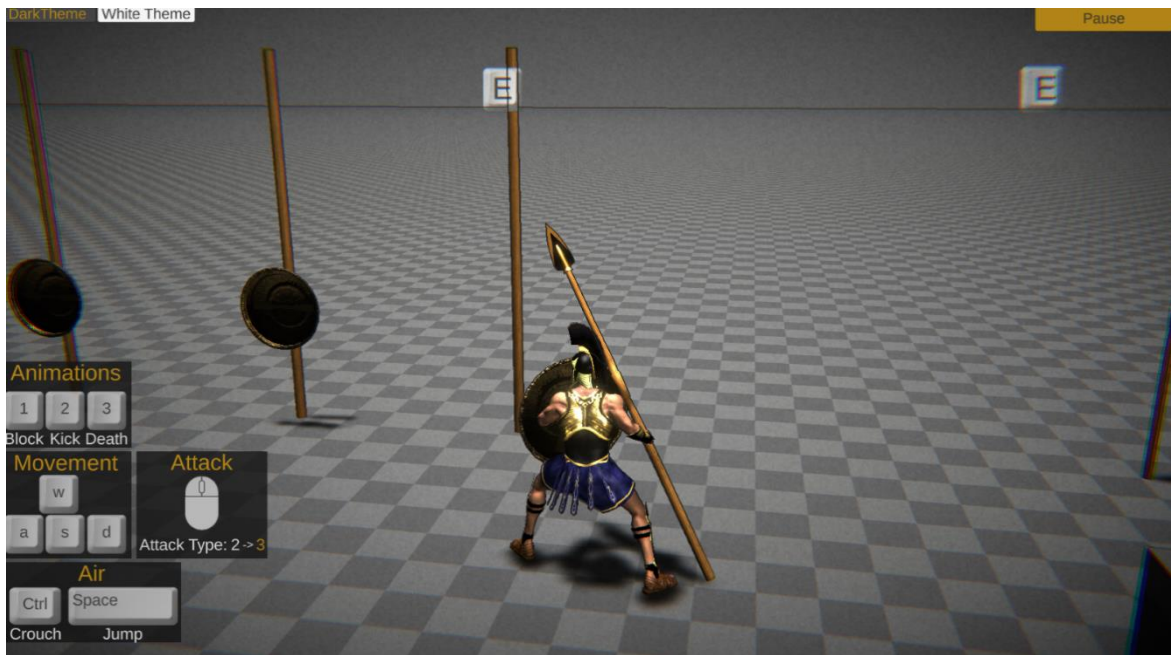
Παρακάτω φαίνεται η διεπαφή χρήστη που δημιουργήθηκε έτσι ώστε να πληροφορεί τον χρήστη για τη λειτουργία κάθε πλήκτρου καθώς και τα κείμενα οδηγιών για τις εργασίες του χρήστη που πρέπει να διεκπεραιώσει έτσι ώστε να ολοκληρωθεί το demo.



Εικόνα 110 Διεπαφή χρήστη με οδηγίες πλήκτρων-λειτουργιών στην πλατφόρμα Unity.

Κάτω αριστερά εμφανίζονται οι κινήσεις του χαρακτήρα με τα αντίστοιχα πλήκτρα, πάνω αριστερά μπορεί να αλλάξει το θέμα του παιχνιδιού σε σχέση με τα χρώματα της διεπαφής χρήστη για να μην κουράζεται το μάτι του χρήστη (σκούρο θέμα, ανοιχτό θέμα), και πάνω δεξιά υπάρχει το πλήκτρο Παύσης για να παύσει ο χρήστης το παιχνίδι.

Το τελικό αποτέλεσμα του παιχνιδιού στην πλατφόρμα της Unity που θα αντικρύσει ο χρήστης αφού λάβει το δόρυ και την ασπίδα φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 111 Τελική μορφή παιχνιδιού στην πλατφόρμα Unity.

Κεφάλαιο 9 Σύνοψη και συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη αλγορίθμων που χρησιμοποιούν οι επαγγελματίες του χώρου δημιουργίας ηλεκτρονικών παιχνιδιών με σκοπό τον σχεδιασμό και την υλοποίηση τρισδιάστατων χαρακτήρων για βιντεοπαιχνίδια.

Στο αρχικό μέρος της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν θεωρητικά κάποια λογισμικά, μερικές τεχνικές και ορισμένοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται σε κάθε τομέα δημιουργίας τρισδιάστατων χαρακτήρων ηλεκτρονικών παιχνιδιών. Τα λογισμικά που παρουσιάστηκαν αναλυτικά μαζί με τις δυνατότητές τους είναι το Blender για την εξ ολοκλήρου δημιουργία του χαρακτήρα (Αχιλλέας της Ομήρου Ιλιάδας) και το Unity για τη δημιουργία του Demo όπου παρουσιάζονται οι κινήσεις και οι δυνατότητες του χαρακτήρα στον τρισδιάστατο χώρο. Ένα άλλο πρόγραμμα που παρουσιάστηκε είναι το Mixamo.com που αφορά τη δημιουργία σκελετού όπως και τη δημιουργία και σύνθεση κινήσεων ενός χαρακτήρα. Κατ' αυτόν τον τρόπο αναδείχθηκαν τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα των προγραμμάτων όσων αφορά τις δυνατότητες που προσφέρουν στους επαγγελματίες αυτού του χώρου. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε η δημιουργία και η κατασκευή βήμα προς βήμα στο πρόγραμμα Blender ενός πιθανού χαρακτήρα ηλεκτρονικού παιχνιδιού, του Αχιλλέα της Ομήρου Ιλιάδας με επεξηγηματικές εικόνες που βοηθούν τον αναγνώστη να κατανοήσει καλύτερα τα βήματα δημιουργίας που ακολουθεί ένας επαγγελματίας.

Ο κλάδος της δημιουργίας των τρισδιάστατων χαρακτήρων είναι πιο εύκολα προσβάσιμος από ποτέ σε κάθε ενδιαφερόμενο που θέλει να εντρυφήσει στο συγκεκριμένο τομέα καθώς υπάρχουν αρκετά δωρεάν λογισμικά τα οποία είναι εξίσου αποτελεσματικά σε σύγκριση με άλλα που απαιτούν χρηματικές συνδρομές και είναι ήδη εξαιρετικά εδραιωμένα στον χώρο.

Κάθε στάδιο δημιουργίας χαρακτήρων είναι αλληλένδετο με το προηγούμενο και το επόμενο και απαιτείται αμειωμένη συνεργασία μεταξύ των επαγγελματιών του κάθε τομέα ώστε να τελεστεί το έργο εντός εύλογου χρονικού ορίου.

Κάθε επάγγελμα σε κάθε στάδιο της δημιουργίας τρισδιάστατων χαρακτήρων απαιτεί αρκετές γνώσεις σε λογισμικά και εργαλεία με συνέπεια να παρέχονται μεγάλες

χρηματικές απολαβές κάνοντας τα επαγγέλματα αυτά ιδιαιτέρως ελκυστικά στη σημερινή εποχή.

Τέλος, διαφορετικοί επιστήμονες όπως φυσικοί, μαθηματικοί και προγραμματιστές διερευνούν διαρκώς και διακαώς νέους αλγορίθμους, τεχνικές, εργαλεία και λογισμικά για τη διευκόλυνση των επαγγελματιών κάθε τομέα της δημιουργίας χαρακτήρων.

9.1 Μελλοντικές επεκτάσεις

Τα τελευταία χρόνια παρατηρούμε μία αλματώδη εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης σε κάθε τεχνολογικό τομέα. Επομένως, θα μπορούσαμε να πούμε πως είναι βέβαιο ότι η τεχνητή νοημοσύνη θα εισέλθει και στους τομείς δημιουργίας χαρακτήρων βιντεοπαιχνιδιών. Για τον λόγο αυτόν, θα ήταν σημαντική η μελλοντική διερεύνηση/έρευνα της επίδρασής της πάνω στα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στον τομέα των βιντεοπαιχνιδιών. Για παράδειγμα, στον τομέα της κίνησης ενός χαρακτήρα, ο επαγγελματίας πρέπει να σχεδιάσει κάθε καρέ της κίνησης με τα εργαλεία που ήδη διαθέτει. Η τεχνητή νοημοσύνη δύναται μελλοντικά να τον βοηθήσει μειώνοντας τον χρόνο διεκπεραίωσης σχεδιασμού μιας κίνησης δίνοντάς του για παράδειγμα τη δυνατότητα τροποποίησης κάποιων υπάρχοντων κινήσεων που έχουν σχεδιαστεί ακόμα και από άλλους επαγγελματίες.

Βιβλιογραφία

- [1] G. Zach, «screenrant.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://screenrant.com/oldest-video-game-characters-mega-man-link/>.
[Πρόσβαση September 2024].
- [2] S. B. Sandra Slutz, «The Pixel Puzzle: Why Video Game Characters Look Better Today,» 30 January 2014.
- [3] S. Shahrani, «gamedeveloper.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.gamedeveloper.com/disciplines/educational-feature-a-history-and-analysis-of-level-design-in-3d-computer-games---pt-1>. [Πρόσβαση September 2024].
- [4] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Ultima_Underworld:_The_Stygian_Abyss.
[Πρόσβαση September 2024].
- [5] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Wolfenstein_3D. [Πρόσβαση September 2024].
- [6] J. Davison, «www.rollingstone.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.rollingstone.com/culture/culture-news/how-quake-changed-video-games-forever-187984/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [7] Leonardo, «www.demodern.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://demodern.com/blog/the-importance-of-immersive-character-design-and-world-building>. [Πρόσβαση September 2024].
- [8] D. Patrick, «www.gameranx.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://gameranx.com/features/id/288495/article/12-new-realistic-graphics-games-of-2022/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [9] «Wikipedia,» 22 December 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://el.wikipedia.org/wiki/Αλγόριθμος>. [Πρόσβαση September 2024].

- [10] J. Clement, «Statista.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.statista.com/statistics/246888/value-of-the-global-video-game-market/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [11] J. Nicholson, «radiotimes,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.radiotimes.com/technology/gaming/gta-5-sales-numbers-revenue/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [12] J. Dorn, «expertbeacon,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://expertbeacon.com/how-much-did-red-dead-redemption-2-make/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [13] «steam-revenue-calculator,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://steam-revenue-calculator.com/app/582010/monster-hunter:-world>. [Πρόσβαση September 2024].
- [14] «steam-revenue-calculator,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://steam-revenue-calculator.com/app/488821/tom-clancy%27s-rainbow-six\(r\)-siege](https://steam-revenue-calculator.com/app/488821/tom-clancy%27s-rainbow-six(r)-siege). [Πρόσβαση September 2024].
- [15] «vgsales.fandom.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://vgsales.fandom.com/wiki/Dungeon_Fighter_Online. [Πρόσβαση September 2024].
- [16] D. Strickland, «Tweaktown,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.tweaktown.com/news/94476/fortnite-made-over-20-billion-in-revenue/index.html>. [Πρόσβαση September 2024].
- [17] D. Curry, «Businessofapps,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.businessofapps.com/data/pubg-mobile-statistics/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [18] S. Gill, «prioridata,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://prioridata.com/data/league-of-legends/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [19] C. Chapple, «pocketgamer.biz,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pocketgamer.biz/pokemon-go-catches-nearly-8-billion-in-eight-years/>. [Πρόσβαση September 2024].

- [20] «researchgate.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/310400933_Game_character_appeal_in_the_eye_of_the_beholder_The_role_of_gendered_perceptions. [Πρόσβαση September 2024].
- [21] P. Plus, «techradar.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.techradar.com/news/gaming/the-evolution-of-3d-games-700995/2>. [Πρόσβαση September 2024].
- [22] P. Staff, «polygon.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.polygon.com/features/2019/11/27/20974490/greatest-video-game-characters-2019-2010-skyrim-witcher-splatoon>. [Πρόσβαση September 2024].
- [23] M. K. K. A. M. G. F. & K. S. Labschütz, «Content creation for a 3D game with Maya and Unity 3D,» p. 124, 2011.
- [24] «docs.blender.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://docs.blender.org/manual/en/latest/interface/window_system/regions.html. [Πρόσβαση September 2024].
- [25] «docs.blender.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://docs.blender.org/manual/en/latest/interface/window_system/workspaces.html. [Πρόσβαση September 2024].
- [26] O. Villar, Learning Blender A Hands-On Guide to Creating 3D Animated Characters, p.119: Addison-Wesley Professional, 2014.
- [27] P.-A. N. Romain Caudron, Blender 3D By Example, Packt Publishing Ltd, 2015.
- [28] «Blender Annual Report,» Blender Foundation, 2023.
- [29] «similarweb,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.similarweb.com/website/blender.org/#demographics>. [Πρόσβαση September 2024].
- [30] «trends.google.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://trends.google.com/trends/explore?date=today%205-y&q=%2Fm%2F0l1qq,%2Fm%2F01tgyn,%2Fm%2F0svhm,%2Fm%2F023q2z,%2Fm%2F03nx_p. [Πρόσβαση September 2024].

- [31] M. a. Y. O. Hussain, «LOD modelling of polygonal models,» Machine Graphics and Vision 14.3, 2005.
- [32] S. F. Q. & D. W. Chen Mao, «Sketch-based virtual human modelling and animation,» σε International Symposium on Smart graphics, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [33] E. Selin, «artisticrender,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://artisticrender.com/10-different-types-of-3d-modeling-techniques/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [34] Arsalan, «it-s.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://it-s.com/what-is-box-modeling/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [35] «vformdesign.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://vformdesign.com/our-process/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [36] W. Osborne, «wayneosborne.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.wayneosborne.com/canetoad-sculpt/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [37] «robotrends,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://robotrends.ru/pub/2341/yaponiya-zadyaystvuet-drony-dlya-kartografirovaniya-i-3d-fiksacii-istoricheskikh-dostoprimechatelnostyay>. [Πρόσβαση September 2024].
- [38] «help.autodesk.com,» Autodesk, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://help.autodesk.com/view/MAYAUL/2025/ENU/?guid=Bifrost_Common_simulate_dynamic_effects_boss_html. [Πρόσβαση September 2024].
- [39] C. Gazdar, «lesterbanks.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://lesterbanks.com/2023/02/how-to-create-a-spiral-staircase-in-houdini/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [40] O. Ushenok, «Artstation.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://olegushenok.artstation.com/store/xM9a/mega-pack-sci-fi-hard-surface-kitbash-400-details>. [Πρόσβαση September 2024].

- [41] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Translation_\(geometry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Translation_(geometry)). [Πρόσβαση September 2024].
- [42] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Rotation_matrix. [Πρόσβαση September 2024].
- [43] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Scaling_\(geometry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Scaling_(geometry)). [Πρόσβαση September 2024].
- [44] «Wikipedia.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Subdivision_surface. [Πρόσβαση September 2024].
- [45] M. K. T. T. Tony DeRose, «Subdivision Surfaces in Character Animation,» Pixar Animation Studios.
- [46] P. T. Krassimira Vlachkova, «A Comparison of Surface Subdivision Algorithms for Polygonal Meshes,» 2012.
- [47] S. M. Z. a. Z. G. Sun, «Smoothing algorithm for planar and surface mesh based on element geometric deformation.,» Mathematical Problems in Engineering, 2015.
- [48] «green-mechanic.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.green-mechanic.com/2021/06/basic-types-shapes-grid-and-geometry.html>. [Πρόσβαση September 2024].
- [49] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_sculpting. [Πρόσβαση September 2024].
- [50] J. X. a. L.-Y. W. Mengqi Peng, «Autocomplete 3D sculpting,» ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 37, Issue 4, Article No.: 132, pp. 1-15, 2018.
- [51] U. S. H.-P. S. Leif P. Kobbelt Mario Botsch, «Feature Sensitive Surface Extraction from Volume Data,» 2001.
- [52] L. K. a. S.-M. H. Yu-Kun Lai, «An incremental approach to feature aligned quad dominant remeshing,» Proceedings of the 2008 ACM symposium on Solid and physical modeling, pp. 137-145, 2008.
- [53] A. Rueda-Toicen, «Github.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://github.com/andandandand/progressive-mesh-reduction-with-edge-collapse>. [Πρόσβαση September 2024].

- [54] B. L. S. P. N. R. J. Maillot, «Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation,» *Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries*, τόμ. 2, pp. 193 - 202, 2023.
- [55] B. L. M. M. a. A. B. Alla Sheffer, «ABF++: fast and robust angle based flattening,» *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Volume 24, Issue 2, pp. 311 - 330, 2005.
- [56] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Bump_mapping. [Πρόσβαση September 2024].
- [57] J. D. H. R. YIWEI HU, «A Novel Framework For Inverse Procedural Texture Modeling,» *ACM Transactions on Graphics*, τόμ. 38, αρ. 6, pp. 1-14, 2019.
- [58] D. A. E. Roggio, «digikey.be,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.digikey.be/nl/articles/led-color-mixing-the-basics>. [Πρόσβαση September 2024].
- [59] «Nvidia.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nvidia.com/en-us/drivers/feature-vertexshader/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [60] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_\(physics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Reflection_(physics)). [Πρόσβαση September 2024].
- [61] «Wikipedia.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Specular_highlight. [Πρόσβαση September 2024].
- [62] J. Stevens, «jordanstevenstechart.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.jordanstevenstechart.com/physically-based-rendering>. [Πρόσβαση September 2024].
- [63] «Wikipedia.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://en.wikipedia.org/wiki/Bidirectional_reflectance_distribution_function. [Πρόσβαση September 2024].
- [64] «dev.opencascade.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://dev.opencascade.org/doc/overview/html/specification__pbr_math.html. [Πρόσβαση September 2024].
- [65] F. Palermo, «cs.cmu.edu,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15462-s09/www/lec/02/lec02b.pdf>. [Πρόσβαση September 2024].

- [66] R. V. Jiri Filip, «Anisotropic Materials Appearance Analysis using Ellipsoidal mirror,» *Measuring, Modeling, and Reproducing Material Appearance*, τόμ. 9398, pp. 222-231, 2015.
- [67] D. Iten, «dorian-iten.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dorian-iten.com/fresnel/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [68] M. T. T.-H. K. J. H. a. J. W. Ge Jin, «Game based Cybersecurity Training for High School Students,» σε *In Proceedings of the 49th ACM Technical Symposium on Computer Science Education (SIGCSE '18)*, New York, USA, 2018.
- [69] I. B. J. Popović, «Automatic rigging and animation of 3D characters,» σε *ACM Transactions on Graphics*, July 2007.
- [70] X. Y. X. X. P. W. J. J. Z. JunJun Pan, «Automatic rigging for animation characters with 3D silhouette,» *Computer Animation and Virtual Worlds Volume 20, Issue 2-3*, pp. 121-131, 22 May 2009.
- [71] J. L. Andreas Aristidou, «A fast ,iterative solver for the Inverse Kinematics problem,» *Graphical Models*, τόμ. 74, αρ. 5, pp. 243-260, 2011.
- [72] G. H. Wei Song, «A Fast Inverse Kinematics Algorithm for Joint Animation,» *International Conference on Advances in Engineering*, pp. 350-354, 2011.
- [73] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate_descent. [Πρόσβαση September 2024].
- [74] D.-S. K. S. T. B. O. a. W. Matteo Menolotto, «Motion Capture Technology in Industrial Applications: A Systematic Review,» *Advanced Measurements for Industry 4.0*, 2020.
- [75] *Behind the Scenes - Uncharted 4: A Thief's End*. [Φιλμ]. Naughty Dog, 2016.
- [76] A. S. M. K. W. M. Zeeshan Bhatti, «Expression Driven Trigonometric Based Procedural Animation of Quadrupeds».
- [77] «netterimages.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.netterimages.com/surface-anatomy-of-upper-limb-unlabeled-77166.html>. [Πρόσβαση September 2024].
- [78] «mixanitouxronou.gr,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mixanitouxronou.gr/to-kolossiaio-agalma-toy-gymnoy-achillea-sto->

- londino-giati-prokalese-skandalo-kai-to-apokaloyn-mnimeio-toy-oyeligkton/.
[Πρόσβαση September 2024].
- [79] «dimosfarsalon.gr,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://dimosfarsalon.gr/diadrastikos-chartis/>. [Πρόσβαση September 2024].
- [80] A. S. M. K. a. W. M. Zeeshan Bhatti, «Zeeshan Bhatti, Asadullah Shah, Mustafa Karabasi and Waheed Mahesar,» International Conference of Informatics and Creative Multimedia, 2013.
- [81] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Quake_\(video_game\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Quake_(video_game)). [Πρόσβαση September 2024].
- [82] «horizon.fandom.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://horizon.fandom.com/wiki/Aloy>. [Πρόσβαση September 2024].
- [83] «Wikipedia,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Augustin-Jean_Fresnel. [Πρόσβαση September 2024].
- [84] «Autodesk.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
<https://download.autodesk.com/global/docs/motionbuilder2013/en-us/index.html?url=files/GUID-3D54C314-2BF4-4C51-8C22-601DD491195E.htm,topicNumber=d30e15670>. [Πρόσβαση September 2024].
- [85] «docs.blender.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available:
https://docs.blender.org/manual/en/4.1/sculpt_paint/sculpting/tool_settings/remesh.html#remesh. [Πρόσβαση September 2024].
- [86] Y. S. H.-Y. L. S. T. M. N. Dave Zhenyu Chen, "Text2Tex: Text-driven Texture Synthesis via Diffusion Models," Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 18558-18568, 2023.