

ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
ΚΑΙ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΠΟΖΩΝ

Η
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Υποβάλλεται στην

ορισθείσα από την Γενική Συνέλευση Ειδικής Σύθεσης
του Τμήματος Πληροφορικής
Εξεταστική Επιτροπή

από τον

Άγγελο Λάζο

ως μέρος των Υποχρεώσεων

για τη λήψη

του

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ
ΜΕ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

Ιανουάριος 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Φούντο Ιωάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, για την πολύ καλή συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών και την βοήθειά του με κάθε τρόπο. Επίσης, ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες κ. Αθανασιάδη Θεόδωρο και κ. Βασιλάκη Ανδρέα-Αλέξανδρο για την βοήθεια και το ενδιαφέρον τους. Τέλος, να ευχαριστήσω τη Δήμητρα για τις επισημάνσεις της στο κείμενο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1. Συνεισφορά - Στόχος	12
1.2. Μεταφορά Παραμόρφωσης	13
1.3. Αντιστοιχία	15
1.4. Επεξεργασία Ακολουθίας	16
1.5. Σχετική Έρευνα	17
1.6. Δομή της Διατριβής	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	22
2.1. Κωδικοποίηση Μετασχηματισμών	25
2.1.1. Απλοϊκή Προσέγγιση	25
2.1.2. Deformation Gradients	25
2.2. Αντιστοιχία	29
2.3. Μεταφορά Μετασχηματισμών	30
2.3.1. Αρχική Προσέγγιση	31
2.3.2. Επαναπροσδιορισμός του Προβλήματος	33
2.4. Ανάλυση	36
2.4.1. Σύστημα Γραμμικών Εξισώσεων	36
2.4.2. Επίλυση	41
2.5. Αποτελέσματα	42
2.5.1. Σκελετικές Παραμορφώσεις	43
2.5.2. Παραμορφώσεις Ελεύθερης Μορφής	46
2.5.3. Ευέλικτη Μεταφορά	47
2.5.4. Περιορισμοί	48
2.5.5. Χρόνοι Εκτέλεσης	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ	53
3.1. Αλγόριθμος	55
3.2. Κατασκευή Ζευγών Αντιστοιχίας	58
3.3. Αποτελέσματα	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ	64
4.1. Κωδικοποίηση Επεξεργασίας	67
4.2. Ενσωμάτωση Επεξεργασίας	67
4.3. Ανάλυση	69
4.4. Αποτελέσματα	72
4.4.1. Τροποποίηση των Χαρακτηριστικών	73
4.4.2. Παραγωγή Διαφοροποιημένης Ακολουθίας	76
4.4.3. Περιορισμοί	80
4.4.4. Μεταφορά Μετασχηματισμών με Επεξεργασία	81

4.4.5. Χρόνοι Εκτέλεσης	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	86
5.1. Συνεισφορά	87
5.2. Επεκτάσεις	89
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	91

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας	Σελ
Πίνακας 2.1 Δεδομένα Μοντέλων.	50
Πίνακας 2.2 Χρόνος Εκτέλεσης για τη Μεταφορά Παραμόρφωσης	51
Πίνακας 3.1 Αριθμός Δεικτών	63
Πίνακας 3.2 Δεδομένα Μοντέλων	63
Πίνακας 4.1 Δεδομένα Μοντέλων	83
Πίνακας 4.2 Χρόνος Επίλυσης Συστήματος	84

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα	Σελ
Σχήμα 5.1 Απεικόνιση της Διαδικασίας της Μεταφοράς των Παραμορφώσεων.	15
Σχήμα 1.2 Απεικόνιση της Διαδικασίας της Επεξεργασίας μιας Ακολουθίας.	17
Σχήμα 2.2 Κατασκευή της τελικής πόζας.	23
Σχήμα 2.2. Υπολογισμός ενός Διανύσματος με Deformation Gradient.	26
Σχήμα 2.3 Απευθείας Εφαρμογή των Deformation Gradients.	32
Σχήμα 2.4 Πίνακες των Κορυφών για δυο Καταστάσεις ενός Τριγώνου.	37
Σχήμα 2.5 Μεταφορά του Καλπασμού του Αλόγου στην Καμήλα.	44
Σχήμα 2.6 Μεταφορά των Παραμορφώσεων από τη Γάτα στο Λιοντάρι.	45
Σχήμα 2.7 Παραγωγή των Ποζών του Σκύλου από την Παραμόρφωση της Γάτας.	45
Σχήμα 2.8 Παραγωγή της ακολουθίας του Human όπως ορίζεται από τον Crane.	45
Σχήμα 2.9 Αναπαραγωγή του εφέ του ξεφουσκώματος από την καμήλα.	46
Σχήμα 2.10 Μεταφορά της Παραμόρφωσης για Διαφορετικά Μοντέλα.	47
Σχήμα 2.11 Παραγωγή Animation από Διαφορετικές Πόζες Αναφοράς.	48
Σχήμα 2.12 Διάγραμμα Σχέσης Διάστασης Συστήματος – Χρόνου.	52
Σχήμα 3.1 Κριτήρια Κατασκευής Ζεύγους Αντιστοιχίας.	59
Σχήμα 3.2 Διαδικασία Συσχέτισης των Μοντέλων Σκύλου και Γάτας.	59
Σχήμα 3.3 Αντιστοιχία Λιονταριού – Γάτας.	60
Σχήμα 3.4 Αντιστοιχία Καμήλας – Αλόγου.	60
Σχήμα 3.5 Συσχέτιση Λιονταριού – Αλόγου.	61
Σχήμα 3.6 Αντιστοιχία Human – Crane.	61
Σχήμα 3.7 Συσχέτιση Παντελονιού – Bouncing	62
Σχήμα 4.1 Ανακατασκευή μιας Πόζας της Ακολουθίας.	66
Σχήμα 4.2 Απευθείας Εφαρμογή των Deformation Gradients.	69
Σχήμα 4.3 Ανακατασκευή των Ποζών της Γάτας.	74
Σχήμα 4.4 Ανακατασκευή της Κατάρρευσης του Αλόγου	74

Σχήμα 4.5 Ανακατασκευή της Κίνησης της Χορεύτριας.	75
Σχήμα 4.6 Επεξεργασία της Επιφάνειας και των Χαρακτηριστικών του Ελέφαντα	75
Σχήμα 4.7 Μετατροπή του Αλόγου σε Καμηλοπάρδαλη.	76
Σχήμα 4.8 Μετατροπή του Bouncing σε Χαρακτήρα Cartoon.	77
Σχήμα 4.9 Ανακατασκευή των Εκφράσεων του Προσώπου.	77
Σχήμα 4.10 Προσαρμογή του Παντελονιού σε Διαφορετικό Σωματότυπο Ανθρώπου.	77
Σχήμα 4.11 Μετατροπή του Αλόγου σε Flamingo.	79
Σχήμα 4.12 Μετατροπή του Bouncing σε Χριστουγεννιάτικο Δέντρο	79
Σχήμα 4.13 Μετατροπή της Χορεύτριας σε Ανθρωπόμορφο Κάκτο	79
Σχήμα 4.14 Μεταφορά Παραμόρφωσης με Επεξεργασία.	82
Σχήμα 4.15 Σχέση Διάστασης Συστήματος – Χρόνου.	85

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Άγγελος Λάζος του Δημητρίου και της Σταματίας. MSc, Τμήμα Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ιανουάριος, 2012. Μεταφορά Παραμόρφωσης και Επεξεργασία Ακολουθίας Πόζων. Επιβλέποντας: Ιωάννης Φούντος.

Η εργασία παρουσιάζει ένα πλαίσιο για την επαναχρησιμοποίηση μιας ακολουθίας από πόζες κίνησης ενός μοντέλου. Η επαναχρησιμοποίηση γίνεται με δύο τρόπους: από την εφαρμογή της παραμόρφωσης που προκύπτει από την αρχική ακολουθία σε ένα στατικό μοντέλο και από την επεξεργασία της ίδιας της ακολουθίας. Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση, το κίνητρο για την ανάπτυξη ήταν η δυσκολία κατασκευής μια νέας πόζας από ένα στατικό αντικείμενο, που να αντιγράφει μια αντίστοιχη πόζα ενός αρχικού. Επίσης, κινητήρια δύναμη ήταν και η δυνατότητα χειρισμού κάθε είδους παραμορφώσεων, χωρίς να γίνεται καμία υπόθεση για τον τρόπο που προήλθαν. Στην περίπτωση της επεξεργασίας, στόχος ήταν η ανάπτυξη μιας μεθόδου που να ενσωματώνει αποδοτικά την παραμόρφωση που προέρχεται από την τροποποίηση οποιασδήποτε πόζας της ακολουθίας.

Συγκεκριμένα, για την κατασκευή μιας νέας ακολουθίας από πόζες βάσει μιας υφιστάμενης, προτείνουμε τη μέθοδο της Μεταφοράς Παραμόρφωσης. Η είσοδος της είναι οι πόζες αναφοράς του αρχικού και του τελικού μοντέλου και η αρχική ακολουθία. Αρχικά, η παραμόρφωση που ορίζεται από τις πόζες κωδικοποιείται για κάθε τρίγωνο με τη χρήση deformation gradients. Έπειτα, για να καθορίσουμε τον τρόπο που θα γίνει η μεταφορά, κατασκευάζουμε μια αντιστοιχία μεταξύ των αντικειμένων ως ένα πλήθος από ζεύγη τριγώνων. Για την κατασκευή κάθε τελικής πόζας, εφαρμόζουμε στα τρίγωνα του τελικού τα ιδανικά deformation gradients, ώστε να πλησιάζουν κατά το δυνατόν περισσότερο στα αντίστοιχα αρχικά. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποδοτική επίλυση ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων υλοποιημένο στην κάρτα γραφικών.

Όσον αφορά την τροποποίηση της ακολουθίας ενός μοντέλου, προτείνουμε τη μέθοδο της Επεξεργασίας Ακολουθίας. Την είσοδο ορίζουν ένα αντικείμενο και ένα πλήθος από πόζες του, καθώς και η επεξεργασμένη εκδοχή μιας επιλεγμένης πόζας από το σύνολο. Η επεξεργασία κωδικοποιείται επίσης με τη χρήση deformation gradients. Δεν τα εφαρμόζουμε όμως απευθείας στις πόζες αλλά στην πόζα αναφοράς του αντικειμένου. Με αυτόν τον τρόπο η ανακατασκευή κάθε πόζας ώστε να ενσωματώνει την επεξεργασία, επιτυγχάνεται με την επίλυση ενός προβλήματος παρόμοιο με αυτό της Μεταφοράς Παραμόρφωσης, με αρχικό μετασχηματισμό το μετασχηματισμό που ορίζεται από την πόζα αναφοράς και τις πόζες της ακολουθίας. Η αποτίμηση της χρησιμότητας των δύο μεθόδων, προήλθε από την εφαρμογή τους σε ένα πλήθος παραδειγμάτων.

EXTENDED ABSTRACT IN ENGLISH

Angelos Lazos, MSc, Computer Science Department, University of Ioannina, Greece. January, 2012. Deformation Transfer and Animation Editing. Thesis Supervisor: Ioannis Fudos.

The topic of the present dissertation is the reuse of existing animations. We present a framework that provides the means for building a new animation for a static model, by following the deformation of an initial one or editing a given animation. The motivation for the first case was the difficulty of creating a new pose for a model similar to a source. Versatility was also a major goal, so as to be able to handle any model and any animation sequence, regardless the way they have been produced. As for the second case, our objective was to develop a method that efficiently modifies an animation sequence, by editing a selected pose of the sequence.

For constructing an animation guided by an existing one, we propose a method that copies the initial deformation to a target model, called Deformation Transfer. The reference poses of both the source and target models as well the source animation, comprise the input of the method. Firstly, the deformation of every source pose is represented per triangle using deformation gradients, inspired by Continuum Mechanics. Secondly, to denote the way the deformation is transferred to the second model, we set up a mapping between triangles of the two models. Finally, to reconstruct every target pose we seek the set of the deformation gradients that should be applied to the source pose to maintain certain geometric constraints that warranty structural consistency and are as close as possible to the initial deformation gradients. We achieve this by efficiently solving linear systems on the GPU.

To amend the problem of modifying an existing animation through minimal user interaction, we propose a method called Animation Editing. Except of the reference pose and the animation sequence, the method requires the existence of a pose that represents the edited version of the selected pose of the sequence. To represent the deformation caused by editing, we follow the concept of deformation gradients. However, instead of applying them directly on every pose we use them to modify the reference pose. By doing so we are able to reconstruct every pose according to the imposed editing, by solving linear systems similar to Deformation Transfer case. The deformation exhibited by the initial animation, is considered as the source deformation gradient. We provide performance results and visual results demonstrating the usefulness of both methods, with different models and animation sequences.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

-
- 1.1 Συνεισφορά - Στόχος
 - 1.2 Μεταφορά Παραμόρφωσης
 - 1.3 Αντιστοιχία
 - 1.4 Επεξεργασία Ακολουθίας
 - 1.5 Σχετική Έρευνα
 - 1.6 Δομή της Διατριβής
-

Η χρήση τρισδιάστατων αντικειμένων σε τομείς που αφορούν την καθημερινότητα αυξάνεται γεωμετρικά τα τελευταία χρόνια. Καθώς η πρόοδος στην τεχνολογία του hardware επιτρέπει χειρισμό μεγάλου όγκου δεδομένων, ο τομέας των γραφικών έχει βρεθεί σε εξέχουσα θέση και οι τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί, βρίσκουν όλο και μεγαλύτερη πρακτική εφαρμογή κυρίως από τη βιομηχανία του κινηματογράφου και των παιχνιδιών. Οι εν λόγω βιομηχανίες, έχουν θέσει ως έναν από τους κύριους στόχους τους τη ρεαλιστικότητα στις παραγωγές τους. Συνεπώς, η κατασκευή πιστικών μοντέλων και η ρεαλιστική απόδοση των κινήσεών τους έχει συγκεντρώσει ένα μεγάλο αριθμό ανθρώπων, καλλιτεχνών και προγραμματιστών, που αφιερώνουν πολλή εργασία για την κατασκευή τους. Πάρα την ύπαρξη όμως όλων των προϋποθέσεων για αξιόλογα αποτελέσματα όσον αφορά τη διαδικασία της κίνησης ενός τρισδιάστατου αντικειμένου, ευρέως γνωστή και ως animation, η ανάπτυξη τεχνικών που βοηθούν με την επαναχρησιμοποίηση κρίνονται απαραίτητες.

Ένα στατικό τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να προκύψει είτε εκ του μηδενός μέσω κάποιας από τις πολλές εφαρμογές που επιτρέπουν σχεδίαση στον 3D χώρο, ή από τη σάρωση κάποιου πραγματικού αντικειμένου με 3D scanner. Με παρόμοιο τρόπο, η παραγωγή ενός animation μπορεί να πραγματοποιηθεί με επεξεργασία ενός μοντέλου αλλάζοντας τη δομή του, μέσω motion capture ή από την εφαρμογή μια συνάρτησης

στα δομικά στοιχεία του. Η κατασκευή της κίνησης σύμφωνα με την πρώτη κατηγορία, απαιτεί τον καθορισμό μιας δομής ελέγχου, η οποία μπορεί για παράδειγμα να είναι ένας αριθμός σημείων ελέγχου πάνω στην επιφάνεια ή εξωτερικά από αυτή, ένας σκελετός που ορίζεται από τη μορφή του ή ένας κλωβός που το περικλείει. Από την επιρροή της δομής ελέγχου πάνω στο αντικείμενο παράγονται νέες πόζες που εφόσον έχουν συνέχεια, μπορούν να αντιμετωπιστούν ως μια συνεχής κίνηση.

Η παραπάνω διαδικασία εκτός ότι απαιτεί μεγάλη δεξιότητα, είναι και πολύ χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό, προέκυψε η ανάγκη για την επαναχρησιμοποίηση μιας ακολουθίας για την παραγωγή της κίνησης ενός δεύτερου αντικειμένου. Μπορούμε να προσεγγίσουμε το πρόβλημα με την ίδια οπτική, δηλαδή να θεωρήσουμε πως η επιθυμητή κίνηση μπορεί να προκύψει εφαρμόζοντας στο δεύτερο μοντέλο τους μετασχηματισμούς της δομής ελέγχου, κατά τη διαδικασία στο αρχικό. Αυτό που απαιτείται είναι η προσαρμογή των παραμέτρων ώστε να εξασφαλιστεί ότι το αποτέλεσμα είναι αποδεκτό για κάθε τμήμα ελέγχου. Για να καταστεί εφικτό όμως κάτι τέτοιο, απαιτείται ο animator να διαθέτει εκτός από ικανότητα και τεχνική γνώση. Τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί ένας σημαντικός αριθμός από μεθόδους που παρακάμπτουν αυτή τη δυσκολία, προτείνοντας αυτόματους ή ημιαυτόματους τρόπους που λύνουν το πρόβλημα της προσαρμογής των παραμέτρων και την παραγωγή της ακολουθίας του νέου animation.

Εκτός όμως από το πρόβλημα της παραμόρφωσης ενός αντικειμένου σύμφωνα με μία υπάρχουσα ακολουθία, χρήσιμη είναι επίσης η δυνατότητα επεξεργασία της ίδιας της ακολουθίας για την αλλαγή της επιφάνειάς του. Αν και συνήθως ο έλεγχος στο αντικείμενο γίνεται πριν την παραγωγή του animation, η αλλαγή τμημάτων της επιφάνειας μπορεί να διορθώσει πιθανά λάθη που κληρονομήθηκαν σε όλες τις πόζες. Συνήθως η χρήση μιας ακολουθίας δεν τερματίζεται έπειτα από το σκοπό για το οποίο έχει σχεδιαστεί, αλλά τις περισσότερες φορές συνεχίζεται σε πολλές ακόμη εφαρμογές. Πιθανώς σε κάποια αυτές η διόρθωσή της ίσως κρίνεται αναγκαία. Επίσης, η διόρθωση μπορεί να αφορά τα χαρακτηριστικά του μοντέλου ώστε να πληρούν κάποια ιδιότητα, όπως για παράδειγμα την περιστροφή ή την αλλαγή του μεγέθους τους. Με παρόμοιο σκεπτικό η επεξεργασία μιας ακολουθίας μπορεί να

αλλάζει το σχήμα της επιφάνειας. Αυτό σημαίνει πως η μορφή των στιγμιότυπων ενός animation μπορεί να αλλάξει σε τέτοιο βαθμό που τελικά το αποτέλεσμα να συγκρίνεται με την κατασκευή μιας ακολουθίας για ένα διαφορετικό αντικείμενο

Επειδή ένα μοντέλο μπορεί να αναπαριστά σχεδόν οτιδήποτε, μη ακολουθώντας απαραίτητα μια σταθερή δομή, είναι αν όχι αδύνατο πολύ δύσκολο να παραχθεί μια γενική μεθοδολογία που να εκμεταλλεύεται την πληροφορία της κίνησής του για την παραγωγή ενός νέου animation. Συνολικά το πλήθος των παραμορφώσεων μπορεί να ενταχθεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις *άκαμπτες παραμορφώσεις (rigid deformations)* που προέρχονται από σκελετικά μοντέλα και η δεύτερη τις *παραμορφώσεις ελεύθερης μορφής (free form deformations)*, οι οποίες πηγάζουν συνήθως από αντικείμενα των οποίων η μορφή δεν ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη δομή. Ένα παράδειγμα σκελετικών σχημάτων αποτελεί ένας χαρακτήρας που αναπαριστά έναν άνθρωπο ή ένα τετράποδο. Όπως στη φύση, έτσι και στη διαδικασία του animation η κίνηση μπορεί να προκύψει από την αλλαγή της θέσης των τμημάτων του σκελετού που ορίζεται για το μοντέλο. Αντίθετα με τις άκαμπτες παραμορφώσεις, οι παραμορφώσεις ελεύθερης μορφής δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν υιοθετώντας μια μεθοδολογία για σκελετικές κινήσεις, αλλά απαιτούν διαφορετική προσέγγιση που εκμεταλλεύεται μόνο την πληροφορία από την επιφάνεια. Οι εκφράσεις ενός προσώπου και η κίνηση ενός υφάσματος αποτελούν ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα αυτής της πολυπληθούς κατηγορίας.

1.1. Συνεισφορά - Στόχος

Εξαιτίας της ύπαρξης μιας ευρείας γκάμας παραμορφώσεων που πηγάζουν από αντικείμενα με διαφορετικά χαρακτηριστικά, η εφαρμογή τους σε στατικά μοντέλα ή η επεξεργασία τους, απαιτεί την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου που να εκμεταλλεύεται τα χαρακτηριστικά αυτά. Για την αξιοποίηση όλου του εύρους των παραμορφώσεων, μια ευρεία μέθοδος πρέπει να παρέχει ένα κατάλληλο μηχανισμό που να χειρίζεται μια αυθαίρετη παραμόρφωση χωρίς να χρειάζεται να θέτει ξεχωριστές υποθέσεις για κάθε σχήμα.

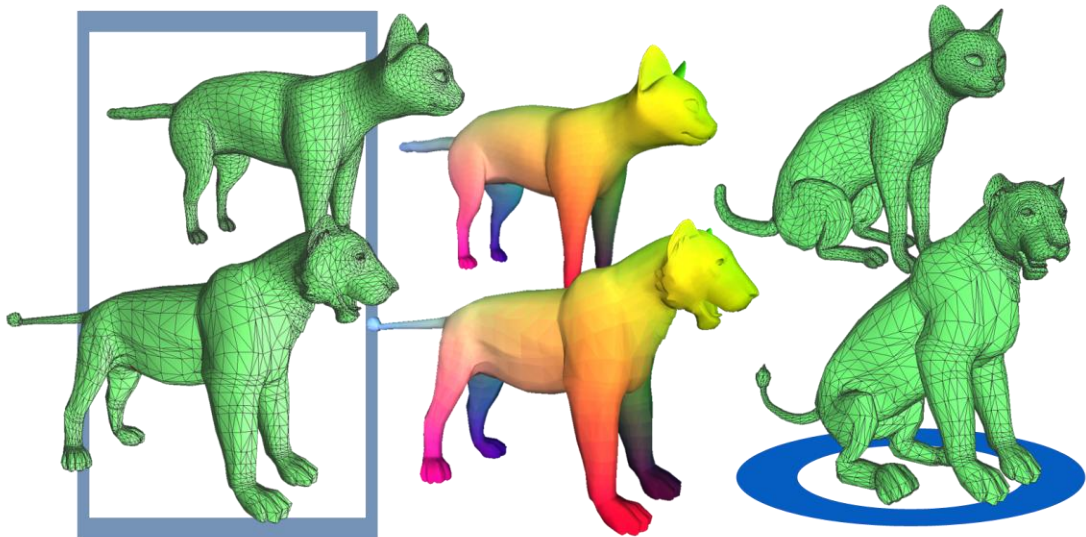
Σύμφωνα με τις γενικές απαιτήσεις του προβλήματος, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση ενός γενικού πλαισίου με εφαρμογή σε τριγωνικά μοντέλα, το οποίο επιτρέπει: 1) την παραγωγή μιας νέας πόζας για ένα αντικείμενο σύμφωνα με την παραμόρφωση που ορίζεται σε ένα αρχικό μοντέλο και 2) την επεξεργασία μιας υπάρχουσας ακολουθίας από την αλλαγή της μορφής ενός στιγμιότυπου της. Στο εξής θα καλούμε τη μέθοδο της παραγωγής μιας ακολουθίας για ένα νέο μοντέλο με τον όρο *Μεταφορά Παραμόρφωσης* και την επεξεργασία μιας υφιστάμενης ως *Επεξεργασία Ακολουθίας*. Στην περίπτωση της παραγωγής ενός νέου animation η παραμόρφωση του τελικού μοντέλου προέρχεται από την εφαρμογή των μετασχηματισμών του αρχικού μέσα από μια αντιστοιχία μεταξύ σημασιολογικά όμοιων τμημάτων του. Αναλύοντας περαιτέρω αυτήν την αντιστοιχία μπορούμε να καταλήξουμε στην εφαρμογή της παραμόρφωσης στα δομικά στοιχεία του μοντέλου, δηλαδή τα τρίγωνα που το αποτελούν. Στη συνέχεια ακολουθεί μια αναλυτικότερη περιγραφή των δύο μεθόδων καθώς και της αντιστοιχίας.

1.2. Μεταφορά Παραμόρφωσης

Η Μεταφορά Παραμόρφωσης εφαρμόζει μια παραμόρφωση σε ένα μοντέλο βασισμένη σε έναν υφιστάμενο μετασχηματισμό. Όταν η είσοδος της μεθόδου αποτελείται από μια ακολουθία από πόζες, η αντίστοιχη ακολουθία για ένα τελικό αντικείμενο προκύπτει από τη επαναληπτική εφαρμογή της Μεταφοράς Παραμόρφωσης για κάθε πόζα. Επειδή δεν γίνεται καμία υπόθεση για τον τρόπο με τον οποίο έχει προκύψει μια πόζα, η μέθοδος αξιοποιεί την μεταβολή που έχουν δεχθεί τα τρίγωνα της επιφάνεια της πόζας αναφοράς του αρχικού μοντέλου και την εφαρμόζει κατάλληλα στο τελικό. Έτσι, ανταποκρίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο για οποιοδήποτε είδος μοντέλων και παραμορφώσεων, δηλαδή είτε ανήκουν στην κατηγορία των άκαμπτων παραμορφώσεων είτε σε αυτή των παραμορφώσεων ελεύθερης μορφής χωρίς να κατασκευάζει καμία επιπλέον δομή ελέγχου., Εκτός από την γενική προσέγγιση όσον αφορά τις παραμορφώσεις, η μέθοδος διευθετεί επίσης το πρόβλημα της διαφορετικής ανάλυσης των δύο μοντέλων. Αυτό σημαίνει πως τα μοντέλα δεν είναι απαραίτητο να μοιράζονται τον ίδιο αριθμό τριγώνων και ο αριθμός τους δεν παίζει σημαντικό ρόλο, αρκεί βέβαια η ανάλυση του δεύτερου μοντέλου να είναι επαρκής για την παραγωγή αποδεκτών αποτελεσμάτων.

Η μεταφορά της παραμόρφωσης για την κατασκευή μια ή περισσότερων νέων ποζών, απαιτεί γενική αντιμετώπιση όσον αφορά την κωδικοποίησή της. Υιοθετούμε τον τρόπο με τον οποίο περιγράφεται η παραμόρφωση ενός αντικειμένου στον τομέα της Μηχανικής μέσω της κλίσης μεταμόρφωσης (*deformation gradient*). Τα deformation gradients περιγράφουν την κίνηση ενός συνεχούς, είναι κατάλληλα για μεγάλες μεταβολές και αναπαρίστανται από 3×3 Ιακωβιανούς πίνακες μιας συνεχούς συνάρτησης στα σημεία ενός αντικειμένου. Στη Μεταφορά Παραμόρφωσης χρησιμοποιούμε μια προσέγγιση των deformation gradients που κατασκευάζονται από τη μεταβολή στα τρίγωνα της επιφάνειας, κωδικοποιώντας έτσι την αλλαγή στην διεύθυνση και στο σχήμα κάθε τριγώνου. Με αυτόν τον τρόπο επιμερίζουμε τη συνολική παραμόρφωση ενός μοντέλου στις παραμορφώσεις στα δομικά του στοιχεία (τρίγωνα), κάνοντας τη μεταφορά τους σε ένα δεύτερο μοντέλο πιο ευέλικτη.

Σύμφωνα με αυτήν την επιμέριση, η μεταφορά της παραμόρφωσης σε ένα μοντέλο προκύπτει από την εφαρμογή των deformation gradients των τριγώνων του αρχικού στα αντίστοιχα τρίγωνα του τελικού. Στην Ενότητα 1.3 περιγράφουμε τον τρόπο που ακολουθούμε ώστε να εξάγουμε μία έγκυρη αντιστοιχία μεταξύ των τριγώνων των δύο επιφανειών. Επειδή τα deformation gradients περιγράφουν την αλλαγή στα τρίγωνα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το διάνυσμα μετατόπισής τους, η εφαρμογή τους στα αντίστοιχα τρίγωνα του τελικού μοντέλου προκύπτει μέσα από την επίλυση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης. Στόχος του είναι η εύρεση των προσεγγιστικών μετασχηματισμών που μιμούνται τους αντίστοιχους αρχικούς, ώστε στη μετασχηματισμένη πόζα να μη δημιουργούνται ασυνέχειες. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται το πρόβλημα της Μεταφορά Παραμόρφωσης για δύο τριγωνικά μοντέλα. Τέλος, η μέθοδος αναλύεται αριθμητικά με τέτοιο τρόπο ώστε η κατασκευή κάθε πόζας του τελικού μοντέλου αλλά και η αντιστοιχία μεταξύ των τριγώνων, προκύπτουν από την επίλυση ενός αριθμού γραμμικών συστημάτων η επίλυση των οποίων είναι αποδοτική ακόμη και για μεγάλα μοντέλα.



Σχήμα 1.1 Απεικόνιση της Διαδικασίας της Μεταφοράς των Παραμορφώσεων.

1.3. Αντιστοιχία

Όπως προκύπτει εύκολα από την ανάλυση της παραμόρφωσης, η μέθοδος απαιτεί μια λογική συσχέτιση μεταξύ τμημάτων των επιφανειών από τα δύο μοντέλα για τη μεταφορά μιας μεταβολής. Η κωδικοποίηση της παραμόρφωσης του αρχικού μοντέλου έχει προκύψει από την παραμόρφωση κάθε τριγώνου ξεχωριστά. Γι αυτό το λόγο για το μετασχηματισμό του δεύτερου μοντέλου εφαρμόζουμε τον κατάλληλο μετασχηματισμό επίσης σε κάθε τρίγωνό του, ώστε τελικά η επιφάνειά του να είναι συνεχής και το αποτέλεσμα αποδεκτό. Αυτό σημαίνει ότι η αντιστοιχία μεταξύ των επιφανειών τελικά ανάγεται σε αντιστοιχία μεταξύ των τριγώνων τους.

Για την κατασκευή των ζευγών αντιστοιχίας η στρατηγική που ακολουθούμε είναι να μετασχηματίσουμε το τελικό μοντέλο, ώστε το σχήμα του να ταιριάζει με το σχήμα του αρχικού μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, δύο τρίγωνα δημιουργούν ένα ζεύγος αν η απόσταση των κέντρων βάρους τους δεν ξεπερνά ένα όριο. Η μέθοδος της προσαρμογής των μοντέλων προϋποθέτει από τον χρήστη τον καθορισμό ενός πλήθους κορυφών-δεικτών πάνω στις δύο επιφάνειες. Η προσαρμογή της επιφάνειας επιτυγχάνεται από την επίλυση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης που καθοδηγείται

από τους δείκτες, οι οποίοι αντιμετωπίζονται ως περιορισμοί στο πρόβλημα. Η διαδικασία είναι ουσιαστικά ένας επαναληπτικός αλγόριθμος, όπου σε κάθε βήμα η διαφορά στο σχήμα των δύο επιφανειών είναι όλο και μικρότερη.

Ύστερα από την ολοκλήρωση του αλγορίθμου, η μετασχηματισμένη επιφάνεια έχει ταιριάζει σε μεγάλο βαθμό στην επιφάνεια του αρχικού μοντέλου. Έτσι, η αντιστοιχία μεταξύ των αντικειμένων προκύπτει από τον έλεγχο για τρίγωνα των οποίων τα κέντρα βάρους βρίσκονται σε μικρή απόσταση. Ως αποτέλεσμα αυτής της προσέγγισης για τον καθορισμό της συσχέτισης, η μέθοδος που ακολουθούμε είναι γενική και ξεπερνά περιορισμούς όπως το γένος (genus) ή η διαφορετική τοπολογία.

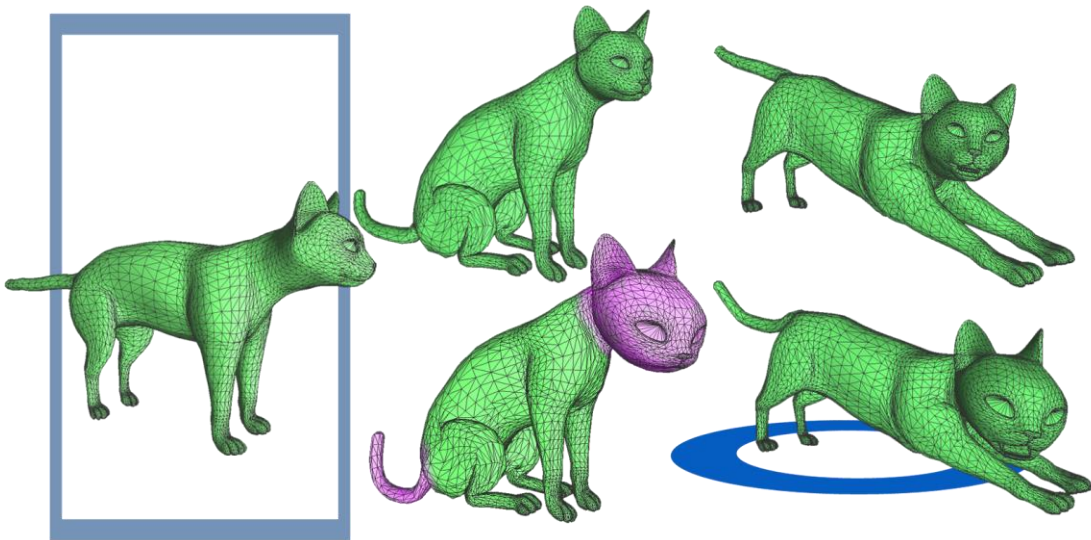
1.4. Επεξεργασία Ακολουθίας

Η επεξεργασία μιας ακολουθίας με όσο το δυνατόν λιγότερη παρέμβαση από το χρήστη και παράλληλα η διατήρηση των χαρακτηριστικών της, είναι το κίνητρο ανάπτυξης της μεθόδου της Επεξεργασίας Ακολουθίας. Δοθείσης μιας επεξεργασμένης πόζας από το πλήθος της ακολουθίας (ονομάζουμε την πόζα της ακολουθίας ως επιλεγμένη πόζα), η παραμόρφωση που εφαρμόστηκε στην επιφάνειά της ενσωματώνεται στην υπόλοιπη ακολουθία με τη διαδοχική εφαρμογή της μεθόδου σε κάθε πόζα. Η έννοια της επεξεργασίας συνήθως υπονοεί παραμορφώσεις ελεύθερης μορφής, χωρίς αυτό να σημαίνει πως οι άκαμπτες παραμορφώσεις δεν συμπεριλαμβάνονται στον όρο. Ανεξάρτητα από το είδος, η μέθοδος εκμεταλλεύεται μόνο τη μεταβολή της επιφάνειας και έτσι είναι κατάλληλη για κάθε πιθανή περίπτωση.

Η Επεξεργασία Ακολουθίας δεν έχει ως στόχο την ανάπτυξη ενός πλαισίου που θα επιτρέπει σε ένα χρήστη να επεξεργαστεί μία πόζα, αλλά θεωρώντας την πόζα ως δεδομένη να ενσωματώνει τη μεταβολή που αυτή ορίζει στο υπόλοιπο animation. Ο τρόπος που αυτό επιτυγχάνεται είναι παρόμοιος με τη διαδικασία για τη μεταφορά των μετασχηματισμών. Η ουσιαστική διαφοροποίηση είναι ότι δεν μετασχηματίζουμε ένα δεύτερο μοντέλο αλλά αναπαράγουμε κάθε πόζα του αρχικού μεταβάλλοντας την επιφάνειά της. Αντίστοιχα με το προηγούμενο πρόβλημα, κωδικοποιούμε την παραμόρφωση για κάθε τρίγωνο που έχει μετασχηματιστεί λόγω της επεξεργασίας με

τη χρήση των deformation gradients. Δεν εφαρμόζουμε όμως απευθείας τα deformation gradients στα τρίγωνα μιας πόζας, γιατί με αυτόν τον τρόπο η επιφάνειά της δεν διατηρεί τη συνέχεια. Αντ'αυτού, εφαρμόζουμε τους Ιακοβιανούς πίνακες που τα αναπαριστούν στην πόζα αναφοράς, που παρότι δεν μετατοπίζουν τα τρίγωνα στις σωστές θέσεις επιτρέπουν την προσέγγιση να αναχθεί στο πρόβλημα της Μεταφοράς Παραμόρφωσης.

Τελικά, μια νέα επεξεργασμένη πόζα κατασκευάζεται από την εφαρμογή στη μετασχηματισμένη πόζα αναφοράς, των μετασχηματισμών που ορίζονται από την αρχική πόζα αναφοράς και την πόζα του animation. Επειδή αναφερόμαστε στο ίδιο μοντέλο, η ανάλυση του οποίου δεν αλλάζει καθ'όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, δεν τίθεται θέμα αντιστοιχίας. Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζεται το πρόβλημα της Επεξεργασίας Ακολουθίας για μία πόζα ενός τριγωνικού μοντέλου. Τέλος, όσον αφορά τον τρόπο επίλυσης ισχύει ακριβώς ότι και στη Μεταφορά Παραμόρφωσης.



Σχήμα 1.2 Απεικόνιση της Διαδικασίας της Επεξεργασίας μιας Ακολουθίας.

1.5. Σχετική Έρευνα

Η παραδοσιακή μεθοδολογία που ακολουθείται για την παραγωγή ενός animation από ένα σκελετικό μοντέλο, ορίζει την κατασκευή μιας σκελετικής δομής και είναι γνωστή ως rigging. Κάθε τμήμα της συσχετίζεται με ένα πλήθος από σημεία του

μοντέλου και με αυτόν τον τρόπο μια νέα πόζα προκύπτει μεταβάλλοντας τη δομή. Επειδή όμως η διαδικασία είναι πολύ επίπονη και χρονοβόρα, έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές που βοηθούν με την αυτόματη κατασκευή και τροποποίηση της δομής [7], [26], [23]. Επίσης η κατασκευή μιας πόζας μπορεί να προκύψει με τη χρήση τεχνικών όπως αυτή στην εργασία [2] ή στην [18], που παρακάμπτει την κατασκευή μιας δομής και παραμορφώνει το μοντέλο ενεργώντας απευθείας στις κορυφές

Το 2004, οι Sumner και Popovic παρουσίασαν μια πρωτοποριακή μέθοδο για την παραμόρφωση ενός στατικού μοντέλου, σύμφωνα με μια ακολουθία από πόζες ενός αρχικού αντικειμένου [16]. Παρακάτω θα αποκαλούμε τη μέθοδο ως DT. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά της είναι η γενικότητά της, αφού μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε είδος παραμορφώσεων. Η παρούσα εργασία βασίζεται και επεκτείνει την αρχική τεχνική του 2004. Όπως είναι φυσικό, επειδή η [16] ήταν η πρώτη που στράφηκε προς αυτήν την κατεύθυνση, έπειτα από την παρουσίαση της, πολλές ακόμη εργασίες στηρίχτηκαν στην ιδέα της μεταφοράς των παραμορφώσεων, επεκτείνοντας την αρχική προσέγγιση.

Στην [3] προτείνεται μια μέθοδος κατά την οποία η παραμόρφωση ενός μοντέλου προκύπτει από ένα ή περισσότερα αρχικά αντικείμενα. Επιλέγοντας περιοχές πάνω στα μοντέλα, καθορίζονται τα τμήματα που παραμορφώνονται με παρόμοιο τρόπο. Συγκεκριμένα, οι περιοχές του τελικού μετασχηματίζονται ώστε το σχήμα και η διεύθυνσή τους να ταιριάζει με τις αντίστοιχες περιοχές των αρχικών. Με αυτόν τον τρόπο καθορίζεται μια αντιστοιχία μεταξύ των σημείων και οι νέες συντεταγμένες υπολογίζονται με τη χρήση mean value coordinates. Σε αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η εργασία [25], στην οποία η κατασκευή ενός animation προκύπτει από τη σύνθεση υπαρχόντων. Κάθε αρχική ακολουθία αναλύεται για να βρεθούν τα τμήματα του μοντέλου που δέχονται μεγάλη παραμόρφωση. Με αυτόν τον τρόπο καθορίζονται οι περιοχές στις οποίες ο χρήστης αναμένεται να τοποθετήσει περισσότερους δείκτες. Για να βρεθεί η αντιστοιχία μεταξύ των τριγώνων, τα μοντέλα μετασχηματίζονται σε ένα ενδιάμεσο σχήμα που κατασκευάζεται από τους δείκτες. Αφού οι αντιστοιχίες καθοριστούν, τα τμήματα που θα μετασχηματιστούν

παρόμοια ορίζονται κυκλώνοντας τα και οι μετασχηματισμοί εφαρμόζονται σε αυτά αφού πρώτα συνδυαστούν κατάλληλα.

Ένας περιορισμός της DT είναι η εφαρμογή της σε αντικείμενα που κατασκευάζονται ως μια ενιαία οντότητα. Η προσέγγιση που παρουσιάζεται στην [9] καταφέρνει να τον παρακάμψει, αφού μπορεί να χειριστεί αντικείμενα κατασκευασμένα από διαφορετικά τμήματα. Αρχικά ορίζεται η χωρική σχέση μεταξύ των τμημάτων και καθορίζεται ένας αριθμός από δείκτες. Υιοθετώντας τον αλγόριθμο αντιστοιχίας της DT, ενώ αναγκάζει κάθε τμήμα χωρίς δείκτες να ακολουθήσει τη διαδικασία αντιστοιχίας, υπολογίζει μια συσχέτιση για ένα πλήθος από τρίγωνα του τελικού. Οι νέες συντεταγμένες του μοντέλου προκύπτουν μέσα από ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης ενέργειας που μετασχηματίζει όλα τα τρίγωνα από κάθε τμήμα.

Αντίθετα με την παραμόρφωση του ίδιου του μοντέλου, νέες μέθοδοι έχουν προταθεί που μετασχηματίζουν το χώρο στον οποίο αυτό βρίσκεται [20], [24], [14]. Στην [13] παρουσιάζεται ένας αποδοτικός τρόπος για μεταφορά των παραμορφώσεων σε ένα δεύτερο αντικείμενο, που βασίζεται σε αυτήν την ιδέα. Το πρώτο βήμα είναι να κατασκευαστούν κλωβοί που περικλείουν τις πόζες αναφοράς των μοντέλων. Στη συνέχεια, για κάθε πόζα του αρχικού υπολογίζεται μια προσέγγιση της παραμόρφωσης με *harmonic maps* όπως στην [14]. Δοθέντος ενός πλήθους από δείκτες στα μοντέλα, υπολογίζεται ένας Ιακοβιανός πίνακας για κάθε δείκτη του αρχικού, ο οποίος μεταφέρεται στους δείκτες του τελικού. Το τελευταίο βήμα για να κατασκευαστεί μία πόζα, είναι η εύρεση των *harmonic maps* για το τελικό μοντέλο διατηρώντας τους περιορισμούς στους δείκτες. Την ίδια φιλοσοφία ακολουθεί και η [10] στηριζόμενη όμως σε *Green Coordinates* [24]. Αυτός ο τρόπος μεταφοράς των παραμορφώσεων είναι γενικός επειδή ο κλωβός μπορεί να περικλείει οποιοδήποτε είδος δομικών στοιχείων, όπως τρίγωνα με συγκεκριμένη συνδεσιμότητα και διάσπαρτα σημεία. Βέβαια, το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι η εξάλειψη των λεπτομερειών της επιφάνειας.

Στην περίπτωση της σημασιολογικής μεταφοράς της παραμόρφωσης, η απευθείας εφαρμογή των παραμορφώσεων δεν είναι κατάλληλη και για αυτό το λόγο απαιτούνται πιο εξελιγμένες μέθοδοι. Στην εργασία [6] προτείνεται μια τέτοια

μέθοδος, που στηρίζεται σε παραδείγματα που παρέχει ο χρήστης για τη σημασιολογική συσχέτιση μεταξύ των αντικειμένων. Τα παραδείγματα αυτά που αποτελούν ζεύγη από πόζες των μοντέλων και αναπαρίστανται ως σημεία σε ένα χώρο υψηλής διάστασης. Κάθε πόζα του αρχικού που δίνεται ως είσοδος, κωδικοποιείται στο χώρο του αρχικού και έπειτα προβάλλεται για να εκφραστεί ως συνδυασμός των παραδειγμάτων του. Συνδυάζοντας με παρόμοιο τρόπο τις πόζες από τα παραδείγματα του τελικού και με την εφαρμογή μιας συνάρτησης από το χώρο του τελικού στον \mathbb{R}^3 , κατασκευάζονται οι τελικές πόζες.

Επειδή κατά την εφαρμογή του DT εκτός από την παραμόρφωση του αρχικού, είναι πιθανόν να μεταφερθούν και οι λεπτομέρειες τις επιφάνειάς του, στην [5] παρουσιάζεται μια μέθοδος για να ξεπεραστεί το πρόβλημα. Όπως προηγουμένως, η διαδικασία βασίζεται σε παραδείγματα από το χρήστη. Αφού οι πόζες κατασκευαστούν όπως στο DT, ο χρήστης παρέχει ένα μικρό αριθμό από πόζες όμοιες με κάποιες που μόλις κατασκευάστηκαν, που καθορίζουν την ιδανική μορφή της επιφάνειας. Οι πόζες αυτές δημιουργούν ένα χώρο παραμέτρων, όπου οι παράμετροι ορίζονται από κάθε άκαμπτο τμήμα που προκύπτει από διαίρεση του μοντέλου. Κάθε πόζα της τελικής ακολουθίας εκφράζεται σε αυτό το χώρο, ώστε να υπολογιστούν κάποια βάρη. Η τελική διόρθωση της ακολουθίας επιτυγχάνεται από την εφαρμογή του συνδυασμού των διορθώσεων και των βαρών. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή της μεθόδου είναι πολύ περιορισμένη αφού χειρίζεται μόνο σκελετικά μοντέλα με συγκεκριμένες ιδιότητες.

Όσον αφορά την επεξεργασία, το πλήθος των εργασιών που έχουν προταθεί αφορούν την τροποποίηση ενός στατικού μοντέλου. Η επεξεργασία μπορεί βέβαια να επεκταθεί και σε ένα animation, όπως γίνεται στην [17]. Η εφαρμογή της δεν περιορίζεται σε τριγωνικά μοντέλα, αλλά μπορεί να χειριστεί όλα τα είδη συστατικών. Η επεξεργασία μιας πόζας ενσωματώνεται στην υπόλοιπη ακολουθία, μέσω ενός γράφου που κατασκευάζονται από κορυφές του μοντέλου και προσαρμόζεται κατάλληλα για κάθε πόζα, με τη διαδικασία να διατηρεί τις λεπτομέρειες τις επιφάνειας. Στην [22] παρουσιάζεται μια μέθοδος για επεξεργασία μιας ακολουθίας από κάποιες πόζες κλειδιά τις οποίες παρέχει ο χρήστης. Η ακολουθία τροποποιείται σύμφωνα με αυτές, που έχουν το ρόλο περιορισμών. Από τη

χρήση της μπορούν να προκύψουν παραδείγματα όπως συνδυασμός animation με εικονικό έδαφος. Επίσης στην [19] η φιλοσοφία της επεξεργασίας μιας ακολουθίας από πόζες επικεντρώνεται κυρίως στην τροποποίηση αντικειμένων ελεύθερων παραμορφώσεων, όπως ρούχα και υφάσματα.

1.6. Δομή της Διατριβής

Η εργασία αποτελείται από συνολικά 5 κεφάλαια, από τα οποία το πρώτο είναι η Εισαγωγή. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται αναλυτικά η μέθοδος της Μεταφοράς Παραμόρφωσης. Αφού γίνει μια εκτενής αναφορά στο πρόβλημα, παρουσιάζεται η κωδικοποίηση της παραμόρφωσης και ο τρόπος που γίνεται η μεταφορά της στο τελικό αντικείμενο με την περιγραφή ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης. Επίσης, παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η μέθοδος για την εξαγωγή της αντιστοιχίας μεταξύ των δύο μοντέλων. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται η γενικότητα της μεθόδου και ο λεπτομερής αλγόριθμος για την κατασκευή των ζευγών αντιστοιχίας. Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει τη μέθοδο της Επεξεργασίας ακολουθίας. Αρχικά γίνεται λόγος για την έννοια και τους στόχους της επεξεργασίας μιας ακολουθίας από πόζες. Στη συνέχεια, δίνεται το πλαίσιο για την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος με στόχο την ανακατασκευή μιας πόζας και ακολουθεί η αποτίμηση της μεθόδου με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που απορρέουν από τις δύο μεθόδους και αναφέρεται η μελλοντική επέκτασή τους. Οι αναφορές αναγράφονται στο τέλος της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

2.1 Κωδικοποίηση Μετασχηματισμών

2.2 Αντιστοιχία

2.3 Μεταφορά Μετασχηματισμών

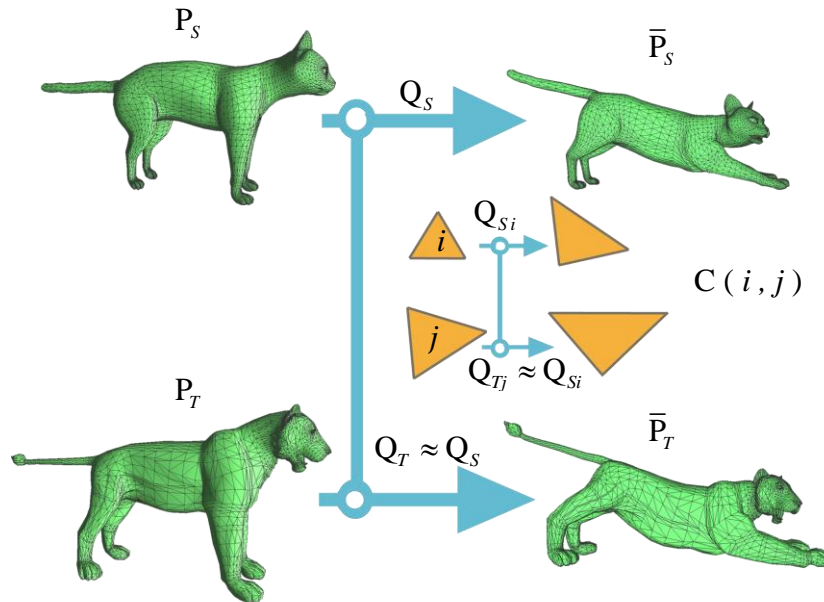
2.4 Ανάλυση

2.5 Αποτελέσματα

Παρά την ύπαρξη ενός σημαντικού αριθμού εργαλείων, τεχνικών και ανθρωπίνων ικανοτήτων η παραγωγή ενός animation από μηδενική βάση παραμένει ακόμη μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία. Αυτή η δυσκολία οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών που βοηθούν με την επαναχρησιμοποίηση των υπάρχοντων δεδομένων. Οι πρώτες από αυτές επινοήθηκαν αρκετές δεκαετίες πριν από εταιρείες κινουμένων σχεδίων δύο διαστάσεων και έγιναν προπομπός των σημερινών, που επεκτείνονται στον 3D χώρο. Παρότι πολλές αξιόλογες τεχνικές έχουν προταθεί, οι περισσότερες από αυτές είναι προσανατολισμένες σε συγκεκριμένες ιδιότητες των animation. Έτσι, πολλές φορές η προσαρμογή τους σε ένα δεύτερο μοντέλο δεν καθίσταται δυνατή ή παράγει ακαλαίσθητα αποτελέσματα.

Στόχος της Μεταφοράς Παραμόρφωσης είναι η γενική αντιμετώπιση στη μεταφορά οποιασδήποτε μεταβολής σε ένα μοντέλο, ώστε να αποφευχθούν οι περιορισμοί που δημιουργούνται από τις ιδιότητές του. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 η Μεταφορά Παραμόρφωσης παράγει μια νέα πόζα \bar{P}_T για ένα στατικό μοντέλο P_T , βάση των μετασχηματισμών Q_S που ορίζονται στα τρίγωνα του αρχικού μοντέλου P_S . Σε κάθε τρίγωνο του τελικού εφαρμόζονται ένας ή περισσότεροι μετασχηματισμοί $Q_{Tj} \approx Q_{Si}$ μέσω της αντιστοιχίας μεταξύ των δύο μοντέλων. Στο Σχήμα 2.1 βλέπουμε τη διαδικασία που εφαρμόζεται από την Μεταφορά Παραμόρφωσης για την παραγωγή

μιας πόζας. Τα P_S και P_T αποτελούνται συνήθως από διαφορετικό αριθμό σημείων και τριγώνων και πολλές φορές ακόμη και ο αριθμός των προεξέχοντων χαρακτηριστικών τους διαφέρει. Για αυτό το λόγο η κατασκευή της \bar{P}_T απαιτεί η κωδικοποίηση των μετασχηματισμών και της συσχέτισης μεταξύ των αντικειμένων να μην περιορίζεται από τέτοιου είδους διαφορές στα μοντέλα.



Σχήμα 2.1 Κατασκευή της τελικής πόζας.

Η ακολουθία των μετασχηματισμών που εφαρμόζονται κατά την επεξεργασία ενός 3D αντικειμένου για την παραγωγή μιας πόζας, μπορεί να αντικατασταθεί από τον συνολικό μετασχηματισμό που ισούται με το γινόμενο τους. Δεδομένου ενός μοντέλου και μιας μετασχηματισμένης πόζας του, είναι σχεδόν βέβαιο πως δεν παρέχεται καμία επιπλέον πληροφορία για τους επιμέρους μετασχηματισμούς. Οι αλγόριθμοι άκαμπτων παραμορφώσεων παρέχουν τη διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την παραγωγή μιας πόζας του αρχικού, μέσω των σημείων ελέγχου. Παρόλα αυτά, η προσαρμογή τους στο τελικό μοντέλο είναι τις περισσότερες φορές επίπονη διαδικασία και εξαρτάται από τη δομή και τις ιδιότητες του, περιορίζοντας έτσι την εφαρμογή τους. Ως εκ τούτου, απαραίτητη προϋπόθεση για τη ευρύτητα της μεθόδου

είναι η απόδοση των μετασχηματισμών να ξεπερνά τις ιδιότητες του μοντέλου και ο τελικός μετασχηματισμός να επαρκεί για την κατασκευή μιας νέας πόζας.

Από την έννοια της μεταφοράς των παραμορφώσεων ενός μοντέλου σε ένα δεύτερο, αμέσως κάποιος σκέφτεται πως ύστερα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας η προκύπτουσα μετασχηματισμένη πόζα μπορεί να συγκριθεί σημασιολογικά με την πόζα του αρχικού. Έτσι δημιουργείται ένα είδος συσχέτισης μεταξύ των χαρακτηριστικών των δύο μοντέλων. Η μέθοδος πρέπει δηλαδή να κατασκευάζει μια αντιστοιχία μεταξύ των τμημάτων των μοντέλων που μετασχηματίζονται με παρόμοιο τρόπο. Όμως για τη κατάλληλη επιλογή του αλγορίθμου αντιστοιχίας, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στον τρόπο με τον οποίο αναπαρίσταται η συνολική παραμόρφωση. Δηλαδή, η αναπαράσταση των μετασχηματισμών και η μέθοδος αντιστοιχίας είναι αλληλοεξαρτώμενες και ο τρόπος προσέγγισης αυτής της εξάρτησης επηρεάζουν την τελική μεταφορά.

Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί στην αποδοτική μεταφορά των μετασχηματισμών. Με την κωδικοποίηση της παραμόρφωσης και τον καθορισμό της αντιστοιχίας να έχουν ολοκληρωθεί, αυτό που μένει για την κατασκευή μιας πόζας είναι η μεταφορά των μετασχηματισμών με τέτοιο τρόπο ώστε η παραγόμενη πόζα να “αντιγράφει” σημασιολογικά τη πόζα του αρχικού αντικειμένου. Θα πρέπει όμως να διατηρείται παράλληλα το πλήθος των στοιχείων που το κατασκευάζουν (κορυφές, τρίγωνα) και η συνδεσιμότητα της πόζας αναφοράς του.

Συμπερασματικά, η Μεταφορά Παραμόρφωσης έχει να αντιμετωπίσει τρία βασικά προβλήματα για την επίτευξη του στόχου. Αυτά είναι τα παρακάτω:

- **Κωδικοποίηση των μετασχηματισμών**
- **Αντιστοιχία των μοντέλων**
- **Μεταφορά των μετασχηματισμών**

Η αποδοτική αντιμετώπισή τους είναι κρίσιμη ώστε η μέθοδος να ξεπερνά τους περιορισμούς από το είδος των παραμορφώσεων και την αποφυγή της κατασκευής δομών ελέγχου. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα περιγράψουμε αναλυτικά κάθε ένα από τα τρία προβλήματα και τον τρόπο επίλυσης τους από μαθηματική σκοπιά.

2.1. Κωδικοποίηση Μετασχηματισμών

Για την παραγωγή μιας πόζας ενός μοντέλου μέσω επαναχρησιμοποίησης, απαιτείται ένας τρόπος κωδικοποίησης της παραμόρφωσης. Η ευρεία εφαρμογή της Μεταφοράς Παραμόρφωσης στηρίζεται στο γεγονός ότι ο τρόπος κατά τον οποίο έχει προκύψει ένα animation δεν επηρεάζει τη διαδικασία που εφαρμόζεται. Η αναπαράσταση της παραμόρφωσης θα πρέπει να ακολουθεί αυτήν την αρχή.

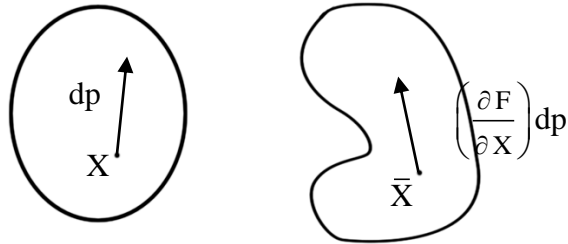
2.1.1. Απλοϊκή Προσέγγιση

Ένας τρόπος για να κωδικοποιήσουμε την παραμόρφωση ενός μοντέλου είναι να λάβουμε υπόψη τη διαφορά στις συντεταγμένες των κορυφών του μεταξύ δύο στιγμιότυπων του. Έτσι δηλαδή για κάθε κορυφή κρατάμε ένα διάνυσμα μετατόπισης, η πρόσθεση του οποίου στις αρχικές κορυφές παράγει τις συντεταγμένες των μετασχηματισμένων κορυφών. Δοθέντος ενός τελικού μοντέλου και μιας αντιστοιχίας μεταξύ των κορυφών, σε κάθε κορυφή του τελικού προσθέτουμε το διάνυσμα μετατόπισης της αντίστοιχης κορυφής από το αρχικό μοντέλο. Η τεχνική αυτή έχει χρησιμοποιηθεί για την περίπτωση μικρών παραμορφώσεων και συγκεκριμένα για την αντιγραφή εκφράσεων μεταξύ προσώπων [8]. Επειδή όμως τα διανύσματα μετατόπισης δεν αντιστοιχούν στις σχετικές μετατοπίσεις των κορυφών για οποιαδήποτε μοντέλο, δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε μοντέλα διαφορετικού μεγέθους. Επιπλέον αξιοποιώντας μόνο τις αρχικές και τελικές θέσεις των κορυφών δεν λαμβάνουμε υπόψη τον πραγματικό μετασχηματισμό που μπορεί να αποτελείται από περιστροφές και αλλαγές του μεγέθους.

2.1.2. Deformation Gradients

Για να επιτύχουμε τη μεταφορά της παραμόρφωσης για τη γενική περίπτωση, πρέπει να βρούμε έναν τρόπο για την αναπαράσταση οποιασδήποτε παραμόρφωσης. Συνήθως, η μεταβολή της επιφάνειας ενός μοντέλου εμπεριέχει παραμορφώσεις μεγάλης κλίμακας. Γι αυτό το λόγο καταφεύγουμε στην Μηχανική Συνεχούς Μέσου, όπου οι μεταβολές που προκαλούνται στα στερεά από εξωτερικές δυνάμεις κωδικοποιούνται με τη χρήση των deformation gradients. Η χρήση τους για την αναπαράσταση των παραμορφώσεων τρισδιάστατων αντικειμένων, παρουσιάστηκε

αρχικά από τον Barr [1] για την εφαρμογή τους σε γεωμετρικά μοντέλα και εξαιτίας της ακριβούς απόδοσής τους συνεχίζεται μέχρι και σήμερα.



Σχήμα 2.2. Υπολογισμός ενός Διανύσματος με Deformation Gradient.

Ακολουθώντας την περιγραφή του [1], οι θέσεις των μετασχηματισμένων κορυφών ενός αντικειμένου προκύπτουν από την εφαρμογή μιας συνάρτησης F στις αρχικές συντεταγμένες. Δηλώνοντας τις συντεταγμένες της κορυφής v του Σχήματος 2.2 ως $X = \{p_1, p_2, p_3\}$, οι νέες συντεταγμένες $\bar{X} = \{\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3\}$ της κορυφής προκύπτουν ως:

$$\bar{X} = F(X). \quad \text{Εξ. 2.1}$$

Αν θεωρήσουμε ότι το διάνυσμα dp στο εσωτερικό του αντικειμένου είναι απειροελάχιστο, βρίσκουμε τη διεύθυνση του, την αλλαγή στην κλίμακα και τη στρέβλωσή του από το deformation gradient:

$$\frac{\partial F}{\partial p} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial p_1} & \frac{\partial F_1}{\partial p_2} & \frac{\partial F_1}{\partial p_3} \\ \frac{\partial F_2}{\partial p_1} & \frac{\partial F_2}{\partial p_2} & \frac{\partial F_2}{\partial p_3} \\ \frac{\partial F_3}{\partial p_1} & \frac{\partial F_3}{\partial p_2} & \frac{\partial F_3}{\partial p_3} \end{bmatrix}, \quad \text{Εξ. 2.2}$$

που καθορίζει την αλλαγή του dp σύμφωνα με την παραμόρφωση F . Τα deformation gradients στην εργασία [1] είναι οι Ιακωβιανοί πίνακες των συντεταγμένων των κορυφών και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των normal και tangent διανυσμάτων ενός αντικειμένου, ύστερα από την εφαρμογή μιας παραμόρφωσης F . Η

παραμόρφωση F όμως είναι γνωστή εξαρχής και έτσι η κατασκευή του Ιακωβιανού πίνακα προκύπτει από τον υπολογισμό των παραγώγων της. Επειδή όμως η αναπαράσταση περίπλοκων παραμορφώσεων είναι δύσκολη μέσω μιας αναλυτικής συνάρτησης, πρέπει να υιοθετεί μια διαφορετική προσέγγιση για την περιγραφή της F στη γενική περίπτωση.

Η παραμόρφωση στον 3Δ χώρο μπορεί να προκύψει θεωρώντας ότι ένα αντικείμενο κατασκευάζεται ως ένα πλήθος από τετράεδρα. Για κάθε τετράεδρο με κορυφές v_1, v_2, v_3 και v_4 η συνάρτηση F ορίζει τις νέες θέσεις των κορυφών $\bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{v}_3$ και \bar{v}_4 από την πόζα αναφοράς στη μετασχηματισμένη πόζα. Έτσι, για κάθε τετράεδρο υπάρχει ένα deformation gradient J που μετασχηματίζει κάθε διάνυσμα σε αυτό από την αρχική στη νέα κατάσταση. Για τα διανύσματα των ακμών ενός τετραέδρου ισχύει:

$$\begin{aligned} J(v_2 - v_1) &= \bar{v}_2 - \bar{v}_1 \\ J(v_3 - v_1) &= \bar{v}_3 - \bar{v}_1 \\ J(v_4 - v_1) &= \bar{v}_4 - \bar{v}_1 \end{aligned} \quad \text{Εξ. 2.3}$$

Αν ορίσουμε τις παραπάνω εξισώσεις σε μορφή πίνακα και λύσουμε ως προς J , λαμβάνουμε τη σχέση:

$$J = \bar{V}V^{-1} \quad \text{Εξ. 2.4}$$

$$\text{με } V = \begin{bmatrix} (v_2 - v_1)_x & (v_3 - v_1)_x & (v_4 - v_1)_x \\ (v_2 - v_1)_y & (v_3 - v_1)_y & (v_4 - v_1)_y \\ (v_2 - v_1)_z & (v_3 - v_1)_z & (v_4 - v_1)_z \end{bmatrix}, \bar{V} = \begin{bmatrix} (\bar{v}_2 - \bar{v}_1)_x & (\bar{v}_3 - \bar{v}_1)_x & (\bar{v}_4 - \bar{v}_1)_x \\ (\bar{v}_2 - \bar{v}_1)_y & (\bar{v}_3 - \bar{v}_1)_y & (\bar{v}_4 - \bar{v}_1)_y \\ (\bar{v}_2 - \bar{v}_1)_z & (\bar{v}_3 - \bar{v}_1)_z & (\bar{v}_4 - \bar{v}_1)_z \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.5}$$

Όπως προκύπτει από την Εξίσωση (2.4) ο πίνακας J για κάθε τετράεδρο μπορεί να κατασκευαστεί όταν οι συντεταγμένες των κορυφών είναι γνωστές για τις δύο καταστάσεις του μοντέλου.

Στο πρόβλημα της Μεταφοράς Παραμόρφωσης οι καταστάσεις του αρχικού μοντέλου είναι μέρος της εισόδου, πράγμα που σημαίνει πως οι πίνακες J μπορούν να

υπολογιστούν. Επειδή όμως τα deformation gradients ορίζονται σε όγκους και από κάθε πόζα έχουμε πληροφορία μόνο για την επιφάνεια του μοντέλου, προκύπτει αναντιστοιχία στα δεδομένα. Μία λύση είναι η τετραεδροποίηση του μοντέλου για κάθε πόζα όπως για παράδειγμα στο [15]. Αν και η συνδεσιμότητα της επιφάνεια του μοντέλου παραμένει η ίδια, η τετραεδροποίηση του εσωτερικού εκτός ότι είναι μια χρονοβόρα διαδικασία συνήθως δεν παράγει την αναμενόμενη αντιστοιχία μεταξύ των τετραέδρων στις πόζες. Το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με επαναληπτική διόρθωση της κατάτμησης, πράγμα που από μόνο του κάνει τη διαδικασία μη αποδοτική. Παρόμοιας φιλοσοφίας τεχνικές έχουν επίσης προταθεί, μερικές από τις οποίες είναι επέκταση μεθόδων για τον 2Δ χώρο αλλά καμία δεν λειτουργεί αποδοτικά στηριζόμενη μόνο στην επιφάνεια.

Στην συνήθη περίπτωση που η επιφάνεια ενός μοντέλου είναι τριγωνική, η αντιστοιχία των τριγώνων παραμένει αμετάβλητη για κάθε στιγμιότυπο. Η πρώτη σκέψη είναι πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις τρεις ακμές των τριγώνων για τον υπολογισμό των πινάκων J_i . Αυτό όμως απορρίπτεται αμέσως αφού το σύστημα που ορίζεται για κάθε εγγραφή του J_i είναι υπό-ορισμένο: ο 3×3 πίνακας έχει εννέα βαθμούς ελευθερίας, ενώ ένα τρίγωνο έχει δύο ανεξάρτητες ακμές άρα έξι βαθμούς ελευθερίας. Όπως προκύπτει, ένα deformation gradient πρέπει να κατασκευάζεται από τρία ανεξάρτητα διανύσματα. Αυτό σημαίνει πως απαιτούνται τέσσερις κορυφές ώστε να καθορίζεται και η κατεύθυνση του τριγώνου.

Σύμφωνα με την παραπάνω παρατήρηση για τη σωστή μεταφορά της παραμόρφωσης πρέπει να καθορίζεται η κατεύθυνση κάθε τριγώνου. Γι αυτό το λόγο, για κάθε τρίγωνο της πόζας αναφοράς του αρχικού μοντέλου κατασκευάζουμε μια τέταρτη κορυφή v_4 κάθετη σε αυτό ως:

$$v_4 = v_1 + \frac{(v_2 - v_1) \times (v_3 - v_1)}{\sqrt{|(v_2 - v_1) \times (v_3 - v_1)|}}. \quad \text{Εξ. 2.6}$$

Αντίστοιχα ορίζεται και η κορυφή \bar{v}_4 για κάθε μετασχηματισμένη πόζα. Ίδια διαδικασία ακολουθείται επίσης για το τελικό μοντέλο. Η κωδικοποίηση της

παραμόρφωσης του αρχικού μοντέλου εκμεταλλεύεται μόνο την πληροφορία που παρέχεται από την επιφάνεια, δηλαδή τις κορυφές του και τη συνδεσιμότητα τους. Τελικά, ο υπολογισμός του πίνακα J για κάθε τρίγωνο, που αναπαριστά το deformation gradient, προκύπτει από την εφαρμογή των εξισώσεων (2.4) και (2.6).

2.2. Αντιστοιχία

Όταν αναφερόμαστε στην επαναχρησιμοποίηση του animation ενός μοντέλου για την παραγωγή ενός νέου, απαραίτητη είναι μια αντιστοιχία μεταξύ των δύο μοντέλων που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η μεταφορά των μετασχηματισμών. Η συσχέτιση μεταξύ δύο φυσικών οντοτήτων είναι συνήθως προφανής, όμως δεν ισχύει το ίδιο όταν αναφερόμαστε στον εικονικό τρισδιάστατο χώρο. Μεταξύ δύο χαρακτήρων για παράδειγμα, είναι αυτονόητο πως τα άνω άκρα του τελικού θα πρέπει να ακολουθήσουν την κίνηση των άνω άκρων του αρχικού και ο κορμός θα πρέπει να μετασχηματιστεί όπως ο κορμός του αρχικού. Η έννοια όμως των χαρακτηριστικών είναι πολύ γενική για τον καθορισμό της συσχέτισης στη Μεταφορά Παραμόρφωσης. Ακόμη και όταν για ένα μοντέλο η πληροφορία για τα χαρακτηριστικά είναι διαθέσιμη, δεν μπορεί να καλύψει τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να γίνει η μεταφορά των μετασχηματισμών μεταξύ των αντίστοιχων χαρακτηριστικών.

Επειδή η συνολική παραμόρφωση του αρχικού μοντέλου έχει αναλυθεί ως οι επιμέρους μετασχηματισμοί των τριγώνων του, η αντιστοιχία καθορίζει τα ζεύγη των τριγώνων που μετασχηματίζονται με παρόμοιο τρόπο. Η αντιστοιχία C κατασκευάζεται ως ένα πλήθος ζευγών, καθένα από τα οποία αποτελείται από το δείκτη i ενός τριγώνου του αρχικού και το δείκτη j ενός τριγώνου του τελικού μοντέλου, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$C = \{(i, j)_1, \dots, (i, j)_{|C|}\}. \quad \text{Εξ. 2.7}$$

Θεωρώντας το ίδιο μοντέλο ως αρχικό και ως τελικό, το πλήθος από τα ζεύγη αντιστοιχίας ισούται με τον αριθμό των τριγώνων του και κάθε ζεύγος κατασκευάζεται από το ίδιο τρίγωνο. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις που τα δύο

μοντέλα διαφέρουν ως προς την ανάλυση, υπάρχουν τέσσερις επιλογές για την κατασκευή του C. Αυτές είναι η *ένα-προς-ένα* (1-1) αντιστοιχία, η *ένα-προς-πολλά* (1-n), η *πολλά-προς-ένα* (n-1) και τέλος η *πολλά-προς-πολλά* (n-n). Η τελευταία είναι και η καταλληλότερη για την Μεταφορά Παραμόρφωσης, αφού η γενικότητα της μεθόδου βασίζεται στο γεγονός ότι ένα τρίγωνο ενός μοντέλου μπορεί να αντιστοιχίζεται με πολλά τρίγωνα του άλλου μοντέλου και αντίστροφα, ξεπερνώντας με αυτόν τον τρόπο τον περιορισμό της ανάλυσης των επιφανειών.

Η δημιουργία βέβαια του C προϋποθέτει την ύπαρξη μιας αντιστοιχίας μικρής κλίμακας μεταξύ κορυφών από τα δύο μοντέλα κατασκευασμένη από το χρήστη, η οποία λειτουργεί ως μια χονδρική αρχική συσχέτιση. Ο αναλυτικός αλγόριθμος για την κατασκευή του συνόλου περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

2.3. Μεταφορά Μετασχηματισμών

Από τη στιγμή που έχουν υπολογιστεί τα deformation gradients για κάθε τρίγωνο της αρχικής πόζας και έχει καθοριστεί η αντιστοιχία μεταξύ των δύο μοντέλων, απομένει το τελευταίο βήμα της διαδικασίας ώστε να παραχθεί μια πόζα του τελικού αντικειμένου. Στόχος της διαδικασίας είναι να βρεθούν οι κατάλληλοι μετασχηματισμοί που όταν εφαρμοστούν στα τρίγωνα του τελικού το αποτέλεσμα να μιμείται την αρχική παραμόρφωση.

Το deformation gradient ενός τριγώνου για δύο στιγμιότυπα ενός μοντέλου, κωδικοποιεί το μετασχηματισμό που όταν εφαρμοστεί στις κορυφές του τριγώνου τις μετασχηματίζει στις νέες τους θέσεις αν δεν λάβουμε υπόψη τη μετατόπιση (Εξίσωση (2.3)). Υποθέτοντας ότι το αρχικό μοντέλο του Σχήματος 2.1 αποτελείται από n τρίγωνα, η παραμόρφωση που προκύπτει από την πόζα αναφοράς P_S και την μετασχηματισμένη πόζα \bar{P}_S , κωδικοποιείται ως το σύνολο των μετασχηματισμών S_i για κάθε τρίγωνο i ως $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$. Για να παραχθεί η πόζα \bar{P}_T του τελικού μοντέλου πρέπει να βρεθεί εκείνη η παραμόρφωση T που θα το μετασχηματίζει με γνώμονα ότι το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην αρχική πόζα \bar{P}_S . Αν υποθέσουμε ότι το πλήθος των τριγώνων του τελικού μοντέλου

είναι m , σκοπός της Μεταφοράς Παραμόρφωσης είναι η κατασκευή του συνόλου $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, δηλαδή η εύρεση για κάθε τρίγωνο του T_j , ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο S_i .

2.3.1. Αρχική Προσέγγιση

Η γενική προσέγγιση για την παραγωγή κάποιου στιγμιότυπου ενός μοντέλου είναι η εφαρμογή του συσχετισμένου μετασχηματισμού $Q+d$ σε κάθε τρίγωνό του, ώστε το σχήμα και η διεύθυνση κάθε τριγώνου να αλλάξουν κατάλληλα στο χώρο ενώ οι τελικές θέσεις των κορυφών του να παράγονται από την εφαρμογή μιας μετατόπισης. Η συνιστώσα Q του συσχετισμένου μετασχηματισμού είναι ένας 3×3 πίνακας που όταν εφαρμοστεί στις κορυφές του τριγώνου προκαλεί αλλαγή στη διεύθυνση και στο μέγεθός του, αφού εμπεριέχει στροφή, αλλαγή στην κλίμακα και στρέβλωση, ενώ η συνιστώσα d είναι το 3×1 διάνυσμα που όταν προστίθεται στις συντεταγμένες των κορυφών του τριγώνου τις μετατοπίζει στις νέες τους θέσεις.

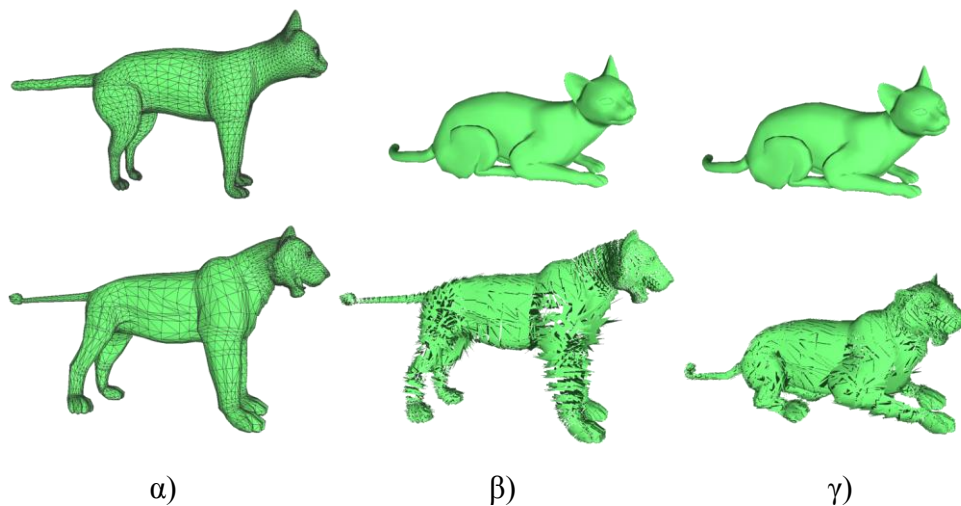
Από τον παραπάνω ορισμό του συσχετισμένου μετασχηματισμού προκύπτει πως η συνιστώσα Q μπορεί να θεωρηθεί ως το deformation gradient του τριγώνου σύμφωνα με την Εξίσωση (2.3). Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό και από τον τύπο:

$$Qv_i + d = \tilde{v}_i, \quad i \in 1 \dots 4 \quad \text{Εξ. 2.8}$$

όπου σε κάθε τρίγωνο θεωρούμε την επιπλέον κορυφή σύμφωνα με την Εξίσωση (2.6) για την κατασκευή του Q . Στη συνέχεια της ενότητας θα αναφερόμαστε στο Q απλά ως μετασχηματισμός και δεν θα το εξισώνουμε με το deformation gradient.

Αν θεωρήσουμε ότι η παραμόρφωση που πηγάζει από ένα μοντέλο εφαρμόζεται στο ίδιο και όχι σε κάποιο με διαφορετική ανάλυση, τότε η διαδικασία που απαιτείται είναι ξεκάθαρη. Αφού η αντιστοιχία μεταξύ των τριγώνων είναι ένα-προς-ένα με κάθε τρίγωνο να συσχετίζεται με τον εαυτό του, ο μετασχηματισμός Q_i που εφαρμόζεται σε ένα τρίγωνο i είναι ακριβής και το διάνυσμα μετατόπισης d_i είναι το ίδιο με τα το διάνυσμα από την παραμόρφωση. Το πρόβλημα αυτής της προσέγγισης εντοπίζεται

στη συνήθη περίπτωση που η ανάλυση των δύο μοντέλων είναι διαφορετική. Όταν σύμφωνα με την αντιστοιχία C οι μετασχηματισμοί Q_i εφαρμοστούν στα τρίγωνα του τελικού μοντέλου προκαλούν στροφή, αλλαγή στην κλίμακα και στρέβλωση τους. Επειδή όμως τα τρίγωνα δεν μετατοπίζονται στις τελικές τους θέσεις, η επιφάνειά τους είναι ασυνεχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.β. Επιχειρώντας να εφαρμόσουμε εκτός από τα Q_i , τα διανύσματα μετατόπισης d_i από τα αντίστοιχα τρίγωνα του αρχικού, η ασυνέχεια της επιφάνειας παραμένει και το μοντέλο έχει τη μορφή του Σχήματος 3.3.γ. Αυτό είναι φυσικό αφού τα d_i περιγράφουν τη πραγματική μετατόπιση του τριγώνων του αρχικού αντικειμένου και όχι τη σχετική μετατόπιση για οποιοδήποτε μοντέλο.



Σχήμα 2.3 Απευθείας Εφαρμογή των Deformation Gradients.

Δεχόμαστε μια παραγόμενη πόζα ως αποδεκτή όταν σημασιολογικά είναι όμοια με την αντίστοιχη από την οποία οδηγείται και η επιφάνειά της είναι συνεχής. Για να μην έχουμε όμως ασυνέχειες σε μια τριγωνική επιφάνεια πρέπει οι διαμοιραζόμενες κορυφές μεταξύ ενός πλήθους τριγώνων να μετασχηματίζονται στο ίδιο σημείο. Αν ορίσουμε τους μετασχηματισμούς των τριγώνων του τελικού που μεταβάλλουν την επιφάνειά του ως Q_x^T και τα διανύσματα μετατόπισης ως d_x , για κάθε τρίγωνο x , θα πρέπει να ισχύει:

$$Q_j^T v_i + d_j = Q_k^T v_i + d_k, \quad \forall i, \forall j, k \in p(v_i) \quad \text{Εξ. 2.9}$$

όπου ως $p(v_i)$ δηλώνουμε το σύνολο των τριγώνων στα οποία συμμετέχει η κορυφή i . Προκειμένου μια παραγόμενη πόζα να είναι αποδεκτή, ορίζουμε το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της διαφοράς μεταξύ των μετασχηματισμών χωρίς μετατόπιση Q^S και Q^T για τα δύο μοντέλα, υπό τον περιορισμό ότι οι διαμοιραζόμενες κορυφές μετασχηματίζονται στο ίδιο σημείο, ως εξής:

$$\min_{Q_1^T + d_1 \dots Q_n^T + d_n} \sum_{r=1}^{|C|} \|Q_j^S - Q_j^T\|_F^2 \quad \text{Εξ. 2.10}$$

$$\text{ώστε } Q_j^T v_i + d_j = Q_k^T v_i + d_k \quad \forall i, \forall j, k \in p(v_i)$$

Η λύση του παραπάνω προβλήματος ελαχιστοποίησης είναι το σύνολο των συσχετισμένων μετασχηματισμών $Q^T + d$ που όταν εφαρμοστούν στις κορυφές των τριγώνων η επιφάνεια του μοντέλου παραμένει συνεχής. Η νόρμα $\|\cdot\|_F$ είναι η τετραγωνική ρίζα της διαφοράς των τετραγώνων των στοιχείων των πινάκων. Παρόλο που η λύση της εξίσωσης μπορεί να προκύψει με γραμμικό προγραμματισμό, το πρόβλημα μπορεί να επαναπροσδιοριστεί με μια πιο προσεκτική ανάλυση ώστε να εξαλειφθούν οι περιορισμοί.

2.3.2. Επαναπροσδιορισμός του Προβλήματος

Το πρόβλημα της ασυνέχειας της επιφάνειας είναι το ζήτημα το οποίο μας οδηγεί στην κατασκευή του προβλήματος ελαχιστοποίησης της Εξίσωσης (2.10), στο οποίο οι περιορισμοί συμπεριλαμβάνουν και τα διανύσματα μετατόπισης. Αντί όμως να θεωρήσουμε την Εξίσωση (2.10) ως την επίλυση της Μεταφοράς Παραμόρφωσης, μπορούμε να επαναπροσεγγίσουμε το πρόβλημα για την κατασκευή μιας πιο αποδοτικής λύσης.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα διανύσματα μετατόπισης είναι το σημαντικότερο μειονέκτημα της προσέγγισης, μια εναλλακτική λύση είναι να τα αγνοήσουμε θεωρώντας ότι η συνιστώσα Q του συσχετισμένου μετασχηματισμού αρκεί για την παραγωγή αποδεκτών αποτελεσμάτων. Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα,

οι μετασχηματισμοί Q είναι ισοδύναμοι με τα deformation gradients, τα οποία ορίζονται από έναν 3×3 πίνακα υπεύθυνο για την αλλαγή του σχήματος και της διεύθυνσης των τριγώνων. Ένα deformation gradient σχετίζεται με τις κορυφές του τριγώνου μέσω των ακμών του. Από την Εξίσωση (2.3) έχουμε: $J_j V_j = \bar{V}_j$. Αν σε κάθε τρίγωνο j εφαρμόσουμε το deformation gradient S_i του αντίστοιχου αρχικού, έχουμε $\bar{V}_j = S_i V_j$, με τις στήλες του να αποτελούν τις μετασχηματισμένες ακμές. Επειδή όμως το S_i είναι ανεξάρτητο της μετατόπισης οι ακμές αντιστοιχούν στις σχετικές θέσεις τους και έτσι η θέση κάθε κορυφής πρέπει να οριστεί αυθαίρετα.

Ένα τρόπος να βρεθούν οι θέσεις οι των κορυφών ώστε η σχετική θέση μεταξύ τους να εξαλείφει τη δημιουργία ασυνέχειας είναι η τοποθέτηση κάθε τριγώνου σε σχέση με ένα γειτονικό του, η θέση του οποίου έχει ήδη καθοριστεί προηγουμένως. Εφαρμόζοντας πρώτα το μετασχηματισμό σύμφωνα με την Εξίσωση (2.3) ξεκινώντας από μια καθορισμένη κορυφή, προσθέτουμε τις ακμές των τριγώνων στα οποία συμμετέχει. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία τελικά όλα τα σημεία τοποθετούνται στις σχετικές τους θέσεις. Αυτή η μέθοδος όμως για την κατασκευή μιας πόζας δεν εξασφαλίζει ότι το αποτέλεσμα είναι αποδεκτό. Όταν η διαδικασία εφαρμοστεί στο ίδιο μοντέλο είναι σίγουρο πως η μετασχηματισμένη επιφάνεια είναι πλήρως συνδεδεμένη. Αν όμως οι μετασχηματισμοί εφαρμοστούν στα αντίστοιχα τρίγωνα ενός δεύτερου μοντέλου, ακόμη και αν θεωρήσουμε μια καθολική μετατόπιση πάνω στο αρχικό, η μετασχηματισμένη επιφάνεια θα περιλαμβάνει τμήματα στα οποία γειτονικά τρίγωνα δεν συνδέονται ή καλύπτουν το ένα το άλλο. Συνεπώς, επειδή τα τρίγωνα των δύο μοντέλων διαφέρουν σχηματικά μεταξύ τους, ακόμη και στην περίπτωση της 1-1 αντιστοιχίας η διαδικασία αποτυγχάνει στην παραγωγή αποδεκτών αποτελεσμάτων. Για αυτό το λόγο, η μέθοδος που υιοθετούμε στη Μεταφορά Παραμόρφωσης και περιγράφεται στη συνέχεια του κεφαλαίου, δεν εφαρμόζει τα αρχικά deformation gradients αλλά υπολογίζει τις κατάλληλες προσεγγίσεις τους.

Για την κατασκευή της μετασχηματισμένης πόζας οι νέες θέσεις των κορυφών του μοντέλου πρέπει να βρεθούν ταυτόχρονα και όχι διαδοχικά. Αντί δηλαδή το σφάλμα που προκύπτει λόγω της διαφοράς στο σχήμα των τριγώνων (που μεταφράζεται ως

αναποτελεσματική εφαρμογή των αρχικών deformation gradients στα τελικά τρίγωνα) να συσσωρεύεται σε ένα σημείο, κατανέμεται στο σύνολο των μετασχηματισμών. Καθώς δεν υπάρχει καμία πόζα που να προκύπτει από την ακριβή εφαρμογή της συνολικής παραμόρφωσης S των deformation gradients, η μέθοδος που ακολουθούμε θεωρεί νέα deformation gradients $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ ως τα πραγματικά.

Αν τα T_j οριστούν με βάση τις συντεταγμένες των άγνωστων κορυφών, τότε αντί για την εύρεση των πλησιέστερων μετασχηματισμών η λύση του προβλήματος ελαχιστοποίησης είναι οι κορυφές αυτές κάθε αυτές. Έτσι, αφού λύνουμε απευθείας για τις συντεταγμένες των κορυφών δεν υφίσταται το θέμα των περιορισμών στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης της Εξίσωσης (2.10), διότι η νέα θέση μιας κορυφής είναι η ίδια για όλα τα τρίγωνα στα οποία ανήκει. Από την Εξίσωση (2.4), κάθε deformation gradient T_j ορίζεται ως ο γραμμικός συνδυασμός των συντεταγμένων των μετασχηματισμένων κορυφών του τριγώνου και των συντεταγμένων από την πόζα αναφοράς. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης ξαναγράφεται ως:

$$\min_{\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n} \sum_{k=1}^{|\mathcal{C}|} \left\| (S_i - T_j)_k \right\|_F^2. \quad \text{Εξ. 2.11}$$

Όπως προκύπτει, το πρόβλημα ελαχιστοποιείται όταν για κάθε ζεύγος αντιστοιχίας οι δύο μετασχηματισμοί είναι ίσοι. Ελαχιστοποιώντας τη διαφορά για κάθε ζεύγος βρίσκουμε εκείνα τα T_j τα οποία είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα S_i . Επειδή όμως τα deformation gradients είναι ανεξάρτητα της μετατόπισης, υπάρχουν άπειρες λύσεις που παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα. Κάθε μία από αυτές είναι αποδεκτή και οι επιμέρους μετατοπίσεις των τριγώνων είναι πάντα οι ίδιες. Για την απόκτηση μιας μοναδικής λύσης αρκεί μία ή περισσότερες κορυφές του μοντέλου να περιοριστούν σε ένα δεδομένο σημείο. Έτσι καταλήγουμε στην τελική μορφή του προβλήματος :

$$\min_{\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n} \sum_{k=1}^{|\mathcal{C}|} \left\| (S_i - T_j)_k \right\|_F^2 \quad \text{Εξ. 2.12}$$

$$\text{ώστε } v_r = w_r, \quad \forall r \in R$$

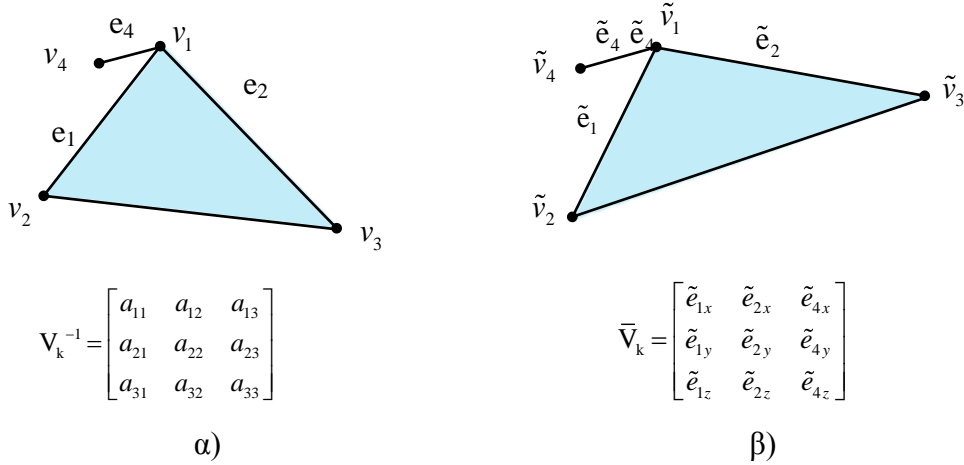
όπου R είναι το σύνολο των κορυφών που περιορίζουν τη λύση και w_r είναι η θέση της κορυφής r . Αυτή η διατύπωση επιτρέπει τη μεταφορά της παραμόρφωσης μεταξύ μοντέλων με διαφορετική τοπολογία σύμφωνα με την κατάλληλη αντιστοιχία C . Όταν ένα τελικό τρίγωνο αντιστοιχίζεται με περισσότερα από ένα τρίγωνα του αρχικού, το πρόβλημα ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ των επιμέρους ζευγών παράγοντας τον κατάλληλο “μέσο όρο” τους.

2.4. Ανάλυση

Η αντικειμενική συνάρτηση της Εξίσωσης (2.12) περιγράφει τη διαισθητική επίλυση του προβλήματος παρουσιάζοντας την απευθείας επίλυση των συντεταγμένων των μετασχηματισμένων κορυφών $\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n$ μέσω της ελαχιστοποίησης των διαφορών των deformation gradients. Για να φτάσουμε όμως στη λύση αναλύουμε σε βάθος τους μετασχηματισμούς ώστε να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι κατασκευάζονται ως γραμμικός συνδυασμός των κορυφών. Αυτή η ανάλυση μας επιτρέπει να γράψουμε το πρόβλημα ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, η επίλυση του οποίου επιτυγχάνεται με αποδοτικό τρόπο με σημαντικά μικρούς χρόνους εκτέλεσης.

2.4.1. Σύστημα Γραμμικών Εξισώσεων

Τα deformation gradients T_j του τελικού μοντέλου κατασκευάζονται από τις συντεταγμένες των κορυφών πριν και μετά τη διαδικασία της μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να εκφραστούν ως ο γραμμικός συνδυασμός των συντεταγμένων των κορυφών από την πόζα αναφοράς, οι τιμές των οποίων είναι γνωστές και των άγνωστων συντεταγμένων των μετασχηματισμένων κορυφών. Θεωρούμε το παράδειγμα του τριγώνου k του Σχήματος 2.4.α με κορυφές v_1, v_2, v_3 και τέταρτη κορυφή την v_4 από την Εξίσωση (2.6) με τις αντίστοιχες ακμές e_1, e_2 καθώς την “ακμή” e_4 . Οι τιμές των ακμών και συνεπώς των κορυφών του μετασχηματισμένου τριγώνου k του Σχήματος 3.4.β είναι άγνωστες και ορίζονται ως $\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \tilde{e}_4$ και $\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \tilde{v}_3, \tilde{v}_4$ αντίστοιχα.



Σχήμα 2.4 Πίνακες των Κορυφών για Δύο Καταστάσεις ενός Τριγώνου.

Έτσι, ο 3×3 πίνακας που ορίζει το T_k είναι το γινόμενο των πινάκων V_k^{-1} και \bar{V}_k που κατασκευάζονται από τα δύο στιγμιότυπα του μοντέλου και εκφράζονται ως ο γραμμικός συνδυασμός των a_{st} με $s, t \in 1 \dots 3$ και των ακμών $\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \tilde{e}_4$ για τις τρεις συνιστώσες x, y και z όπως παρακάτω:

$$\begin{aligned} T_{1r} &= \tilde{e}_{1x} a_{1r} + \tilde{e}_{2x} a_{2r} + \tilde{e}_{4x} a_{3r} \\ T_{2r} &= \tilde{e}_{1y} a_{1r} + \tilde{e}_{2y} a_{2r} + \tilde{e}_{4y} a_{3r} \\ T_{3r} &= \tilde{e}_{1z} a_{1r} + \tilde{e}_{2z} a_{2r} + \tilde{e}_{4z} a_{3r} \end{aligned} \quad \text{με } r \in 1 \dots 3. \quad \text{Εξ. 2.13}$$

Επειδή όμως οι ακμές κατασκευάζονται από τις άγνωστες κορυφές του τριγώνου, τελικά τα στοιχεία του πίνακα είναι ο γραμμικός συνδυασμός της συνιστώσας των τριών κορυφών του επί την αντίστοιχη στήλη του V_k^{-1} . Έτσι ο γενικός τύπος που περιγράφει τα στοιχεία του πίνακα για τις τρεις συνιστώσες x, y και z για οποιοδήποτε τρίγωνο j με κορυφές $v_1^j, v_2^j, v_3^j, v_4^j$ και $\tilde{v}_1^j, \tilde{v}_2^j, \tilde{v}_3^j, \tilde{v}_4^j$ είναι ο:

$$\begin{aligned} T_{1r} &= -(a_{1r} + a_{2r} + a_{3r}) \bar{v}_{1x}^j + a_{1r} \bar{v}_{2x}^j + a_{2r} \bar{v}_{3x}^j + a_{3r} \bar{v}_{4x}^j \\ T_{2r} &= -(a_{1r} + a_{2r} + a_{3r}) \bar{v}_{1y}^j + a_{1r} \bar{v}_{2y}^j + a_{2r} \bar{v}_{3y}^j + a_{3r} \bar{v}_{4y}^j \\ T_{3r} &= -(a_{1r} + a_{2r} + a_{3r}) \bar{v}_{1z}^j + a_{1r} \bar{v}_{2z}^j + a_{2r} \bar{v}_{3z}^j + a_{3r} \bar{v}_{4z}^j \end{aligned} \quad \text{με } r \in 1 \dots 3. \quad \text{Εξ. 2.14}$$

Αφού οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για κάθε τρίγωνο ενός μοντέλου με m τρίγωνα

και n κορυφές, μπορούμε να ορίσουμε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων μεταξύ όλων των deformation gradients και των μετασχηματισμένων κορυφών $\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n$. Από το σύστημα αυτό οδηγούμαστε τελικά στην κατασκευή ενός προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων για το πρόβλημα της μεταφοράς παραμόρφωσης. Για να φτάσουμε στην επίλυση του συστήματος αρχικά εκφράζουμε τις σχέσεις με τη μορφή πινάκων, ξεκινώντας από τον πίνακα που περιέχει όλες τις άγνωστες κορυφές. Ο $3(m+n) \times 1$ πίνακας X αποτελείται από τις συντεταγμένες x, y, z των $\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n$ και των επιπλέον κορυφών που κατασκευάζουμε για κάθε τρίγωνο με τη σειρά που φαίνεται παρακάτω.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad X_1 = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{1x} \\ \tilde{v}_{2x} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{nx} \\ \tilde{v}_{(n+1)x} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{(n+m)x} \end{bmatrix} \quad X_2 = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{1y} \\ \tilde{v}_{2y} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{ny} \\ \tilde{v}_{(n+1)y} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{(n+m)y} \end{bmatrix} \quad X_3 = \begin{bmatrix} \tilde{v}_{1z} \\ \tilde{v}_{2z} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{nz} \\ \tilde{v}_{(n+1)z} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{(n+m)z} \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.15}$$

Ο πίνακας X δηλαδή περιέχει πρώτα τις x συντεταγμένες των κορυφών και ακολουθούν οι y και z . Με παρόμοιο τρόπο κατασκευάζεται και ο πίνακας Q ο οποίος περιέχει όλα τα στοιχεία κάθε πίνακα που αναπαριστά ένα deformation gradient T_j . Ο Q αποτελείται από τους τρεις επιμέρους πίνακες Q_1, Q_2 και Q_3 καθένας από τους οποίους κατασκευάζεται από τα στοιχεία μίας γραμμής για κάθε T_j .

$$Q_3 = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{bmatrix} \quad Q_1 = \begin{bmatrix} T_{11}^1 \\ T_{12}^1 \\ T_{13}^1 \\ \vdots \\ T_{11}^m \\ T_{12}^m \\ T_{13}^m \end{bmatrix} \quad Q_2 = \begin{bmatrix} T_{21}^1 \\ T_{22}^1 \\ T_{23}^1 \\ \vdots \\ T_{21}^m \\ T_{22}^m \\ T_{23}^m \end{bmatrix} \quad Q_3 = \begin{bmatrix} T_{31}^1 \\ T_{32}^1 \\ T_{33}^1 \\ \vdots \\ T_{31}^m \\ T_{32}^m \\ T_{33}^m \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 2.16}$$

Οι πίνακες Q_1, Q_2 και Q_3 έχουν μέγεθος $3m \times 1$ αφού κάθε ένας από αυτούς αποθηκεύει τα τρία στοιχεία μιας γραμμής για κάθε T_j . Ως εκ τούτου ο Q είναι

κορυφών του μοντέλου. Έτσι, αντί να λύσουμε το συνολικό σύστημα, λύνουμε τρία ξεχωριστά υποσυστήματα με διάσταση ίση με $1/3$ της αρχικής.

Όπως περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα, σκοπός της Μεταφορά παραμόρφωσης είναι η εύρεση του συνόλου $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ ώστε για κάθε ζεύγος αντιστοιχίας (i, j) του C , το T_j να πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο στο αντίστοιχο S_i . Ακολουθώντας τη μορφή του γραμμικού συστήματος της Εξίσωσης (2.18) ορίζουμε τη μορφή του προβλήματος της μεταφοράς παραμόρφωσης ως:

$$\tilde{A} X = \tilde{Q}. \quad \text{Εξ. 2.19}$$

Ο πίνακας X παραμένει ίδιος με πριν αφού οι άγνωστοι του συστήματος εξακολουθούν να είναι οι συντεταγμένες των κορυφών. Θεωρώντας τη γενική περίπτωση της n - n αντιστοιχίας η διάσταση του συστήματος εξαρτάται από το πλήθος $|C|$. Για κάθε ζεύγος αντιστοιχίας (i, j) στον πίνακα \tilde{Q} αποθηκεύονται οι τιμές του πίνακα S_i , οι οποίες είναι γνωστές και στον πίνακα \tilde{A} οι αντίστοιχες τιμές από τον πίνακα V_j για το τρίγωνο j . Άρα, η διάσταση του συστήματος είναι ίση με $9|C| \times (m+n)$. Λύνοντας όμως για κάθε συντεταγμένη ξεχωριστά, τα επιμέρους συστήματα $\tilde{A}' X_i = \tilde{Q}_i$, για $i = 1, 2, 3$ έχουν διάσταση $3|C| \times (m+n)$. Στο παράδειγμα που ακολουθεί φαίνεται η αναλυτική μορφή των πινάκων για το γραμμικό σύστημα $\tilde{A}' X_1 = \tilde{Q}_1$ για ένα μόνο ζεύγος (i, j) .

$$\begin{array}{c}
 \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & n+m \end{matrix} \\
 \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ 3|C| \end{matrix} \left[\begin{array}{cccc} & & & \\ & & & \vdots \\ & & & \\ & a_{11}^j & a_{11}^j & a_{12}^j & a_{13}^j \\ \dots & a_{21}^j & \dots & a_{21}^j & \dots & a_{22}^j & \dots & a_{23}^j & \dots \\ & a_{31}^j & a_{31}^j & a_{32}^j & a_{33}^j \\ & & & \vdots \\ & & & \vdots \end{array} \right] \begin{bmatrix} \tilde{v}_{1,x} \\ \tilde{v}_{2,x} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{n,x} \\ \tilde{v}_{(n+1),x} \\ \vdots \\ \tilde{v}_{(n+m),x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ S_{11}^i \\ S_{12}^i \\ S_{13}^i \\ \vdots \end{bmatrix}
 \end{array}$$

2.4.2. Επίλυση

Επειδή οι κορυφές ενός μοντέλου συμμετέχουν πάντα σε περισσότερα από ένα τρίγωνα, ακόμα και στην περίπτωση της 1-1 αντιστοιχίας, οι γραμμές του \tilde{A} είναι περισσότερες από της στήλες του. Αυτό σημαίνει πως το σύστημα είναι υπέρ-ορισμένο και γι αυτό είναι αδύνατον να βρεθεί το σύνολο των deformation gradients που να ισούνται με τα S_i . Γι αυτό το λόγο κατασκευάζουμε το σύνολο $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ ως την προσέγγιση των S_i από την επίλυση του γραμμικού συστήματος ως ένα πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων. Όπως εξηγήσαμε παραπάνω το πρόβλημα μπορεί να οριστεί ως τα επιμέρους προβλήματα ελαχίστων τετραγώνων, και είναι αντίστοιχο με το αυτό της Εξίσωσης (2.12).

$$\min_{\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n} \left\| \tilde{A}' X_i - \tilde{Q}_i \right\|_2^2, \quad i \in 1 \dots 3 \quad \text{Εξ. 2.20}$$

$$\text{ώστε } v_k = w_k, \quad \forall k \in K .$$

Για να αφαιρέσουμε τους περιορισμούς από το πρόβλημα αρχικά σβήνουμε τις σταθερές κορυφές από τον πίνακα X_i . Επιπλέον, πολλαπλασιάζουμε τις τιμές των συντεταγμένων των w_k με τις αντίστοιχες εγγραφές του πίνακα \tilde{A} και αφαιρούμε το αποτέλεσμα από τις αντίστοιχες εγγραφές των πινάκων \tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2 και \tilde{Q}_3 . Οι στήλες του \tilde{A} για τις σταθερές κορυφές πρέπει επίσης να σβηστούν. Η μορφή του προβλήματος ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς είναι:

$$\min_u \left\| \hat{A} \hat{X}_i - \hat{Q}_i \right\|_2^2, \quad i \in 1 \dots 3, \quad \text{Εξ. 2.21}$$

όπου u είναι το σύνολο των ελεύθερων κορυφών του μοντέλου. Ο υπολογισμός $\hat{A} \hat{X}_i - \hat{Q}_i$ είναι στην ουσία η διαφορά μεταξύ των ιδανικών deformation gradients που μετασχηματίζουν το τελικό μοντέλο και των deformation gradients S_i από την παραμόρφωση του αρχικού. Το πρόβλημα τελικά ελαχιστοποιεί το άθροισμα των διαφορών μεταξύ των στοιχείων των πινάκων για τα S_i και T_j . Για να βρεθεί το ελάχιστο, ως γνωστόν πρέπει να βρούμε την παράγωγο της νόρμας για κάθε κορυφή του \hat{X}_i και να τη θέσουμε ίση με μηδέν. Αναλύοντας πρώτα τη νόρμα έχουμε:

$$\begin{aligned}
\|\hat{A}\hat{X}_i - \hat{Q}_i\|_2^2 &= (\hat{A}\hat{X}_i - \hat{Q}_i)^\top (\hat{A}\hat{X}_i - \hat{Q}_i) \\
&= \hat{X}_i^\top \hat{A}^\top \hat{X}_i - \hat{X}_i^\top \hat{A}^\top \hat{Q}_i - \hat{Q}_i^\top \hat{A} \hat{X}_i - \hat{Q}_i^\top \hat{Q}_i \\
&= \hat{X}_i^\top \hat{A}^\top \hat{A} \hat{X}_i - \hat{X}_i^\top \hat{A}^\top \hat{Q}_i - (\hat{Q}_i^\top \hat{A} \hat{X}_i)^\top - \hat{Q}_i^\top \hat{Q}_i \\
&= \hat{X}_i^\top \hat{A}^\top \hat{A} \hat{X}_i - 2\hat{X}_i^\top \hat{A}^\top \hat{Q}_i - \hat{Q}_i^\top \hat{Q}_i
\end{aligned}
\tag{Εξ. 2.22}$$

Παραγωγίζοντας την προηγούμενη σχέση ως προς \hat{X}_i και θέτοντας την παράγωγο ίση με μηδέν τελικά λαμβάνουμε τις κανονικές εξισώσεις:

$$\hat{A}^\top \hat{A} \hat{X}_i = \hat{A}^\top \hat{Q}_i. \tag{Εξ. 2.23}$$

Επειδή το αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού του ανάστροφου ενός πίνακα με τον εαυτό του είναι πάντοτε ένας συμμετρικό πίνακα, ο $\hat{A}^\top \hat{A}$ έχει ίδιο αριθμό γραμμών και στηλών, ο οποίος ισούται με το πλήθος των ελεύθερων κορυφών συν τις επιπλέον κορυφές για κάθε τρίγωνο.

2.5. Αποτελέσματα

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου της Μεταφοράς Παραμόρφωσης θα εξεταστεί από την εφαρμογή της σε ένα πλήθος περιπτώσεων ώστε να καλυφθούν και οι δύο κατηγορίες παραμορφώσεων, δηλαδή οι σκελετικές και οι παραμορφώσεις ελεύθερης μορφής. Εκτός από την εφαρμογή της σε ζεύγη τα οποία έχουν μεγάλη ομοιότητα θα σχολιάσουμε τις περιπτώσεις που τα δύο μοντέλα έχουν διαφορετική δομή και ιδιότητες και θα περιγράψουμε τις αστοχίες της και τους περιορισμούς που αντιμετωπίζει.

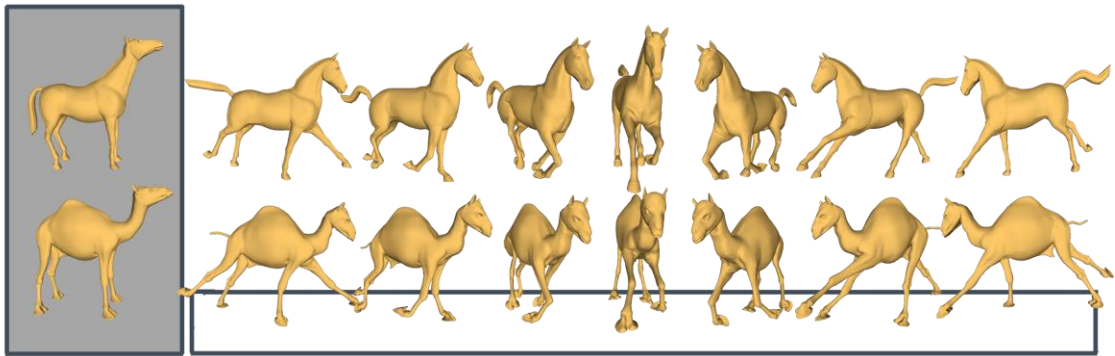
Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, η παραγωγή μιας πόζας επιτυγχάνεται με την επίλυση ενός αραιού συστήματος γραμμικών εξισώσεων με αγνώστους τις συντεταγμένες των κορυφών της. Η υλοποίηση του συστήματος έγινε αρχικά για τον επεξεργαστή (CPU) και στη συνέχεια για την κάρτα γραφικών (GPU), στην οποία

στρέφεται το ενδιαφέρον όχι μόνο από τον τομέα των γραφικών αλλά και από πολλούς άλλους τομείς και επιστήμες. Για την υλοποίηση στη CPU χρησιμοποιήσαμε τη βιβλιοθήκη SuperLU η οποία παρέχει την άμεση μέθοδο της παραγοντοποίησης LU και της εύρεσης των λύσεων με προς-τα-πίσω-επίλυση. Όσον αφορά την GPU, η υλοποίηση έγινε με την βιβλιοθήκη CUSP η οποία είναι κατάλληλη για γραμμική άλγεβρα αραιών πινάκων και υπολογισμούς σε γράφους και είναι υλοποιημένη σε CUDA. Επιπλέον, η γλώσσα που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή είναι η C++. Όλα τα πειράματα εκτελέστηκαν σε ένα μηχάνημα με επεξεργαστή Intel(R) Core(TM) i7 στα 3.20 GHz και 12GB RAM, με κάρτα γραφικών NVIDIA GeForce GTX 560 με 330 πυρήνες.

Σε κάθε παράδειγμα που παραθέτουμε η μορφή των σχημάτων είναι ίδια και περιγράφει τον τρόπο εκτέλεσης της μεθόδου. Καταρχάς, στην αριστερή πλευρά κάθε σχήματος, με γκριζο φόντο, φαίνονται οι πόζες αναφοράς των δύο μοντέλων. Η πρώτη γραμμή από πόζες αναπαριστά την ακολουθία για το αρχικό μοντέλο, που μαζί με τις πόζες αναφοράς και την αντιστοιχία αποτελούν την είσοδο της μεθόδου. Η έξοδος της διαδικασίας φαίνεται στη δεύτερη γραμμή και περιλαμβάνει όλες τις πόζες που δημιουργήθηκαν βάσει των αρχικών παραμορφώσεων.

2.5.1. Σκελετικές Παραμορφώσεις

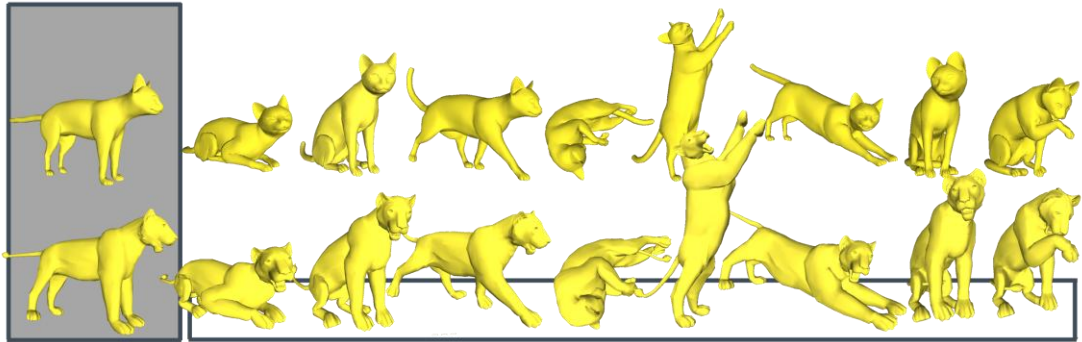
Το πρώτο παράδειγμα που παραθέτουμε για την αποτίμηση της Μεταφοράς Παραμόρφωσης και είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα των σκελετικών παραμορφώσεων, είναι αυτό του Σχήματος 2.5. Για κάθε στιγμιότυπο της ακολουθίας του Αλόγου, η παραμόρφωση που ορίζεται σε σχέση με την πόζα αναφοράς εφαρμόζεται στην πόζα αναφοράς της Καμήλας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι όμοια με τα αντίστοιχα αρχικά, προσαρμοσμένα βέβαια στο σχήμα της και αναπαράγουν πειστικά την κίνηση.



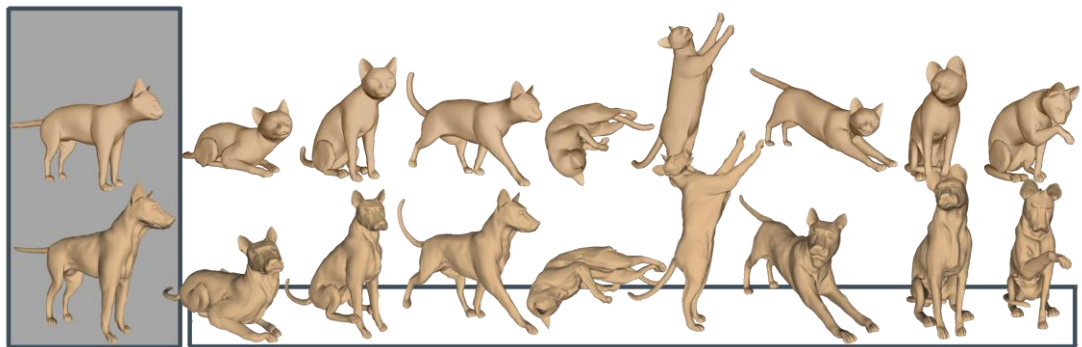
Σχήμα 2.5 Μεταφορά του Καλπασμού του Αλόγου στην Καμήλα.

Τα αποτελέσματα επίσης των σχημάτων 2.6 και 2.7 είναι ένα καλό δείγμα της αποτελεσματικότητας της μεθόδου. Αντίθετα με το animation του Αλόγου στο οποίο η παραμόρφωση αφορά κυρίως τα άκρα και είναι πιο ξεκάθαρη, οι πόζες τις Γάτας ορίζουν μεγάλη μεταβολή της επιφάνειάς της. Σχεδόν σε όλες από αυτές, η παραμόρφωση αφορά όλα τα τμήματα της επιφάνειας με χαρακτηριστικό παράδειγμα το κουλούριασμα της τέταρτης πόζας. Όμως, τόσο τα αποτελέσματα για το μοντέλο του Λιονταριού όσο και για αυτό του Σκύλου, είναι σημασιολογικά όμοια με αυτά της Γάτας και η επιφάνειά τους έχει διατηρήσει την αρχική της μορφή. Η παραμόρφωση που προκύπτει επίσης από τις πόζες του μοντέλου του ανθρώπου (θα τον αποκαλούμε Crane) του Σχήματος 2.8 μεταφέρεται σωστά στο χαρακτήρα Human, αν και το σώμα του δεύτερου είναι επίπεδο και στα ρούχα του πρώτου δημιουργούνται τσαλακώματα.

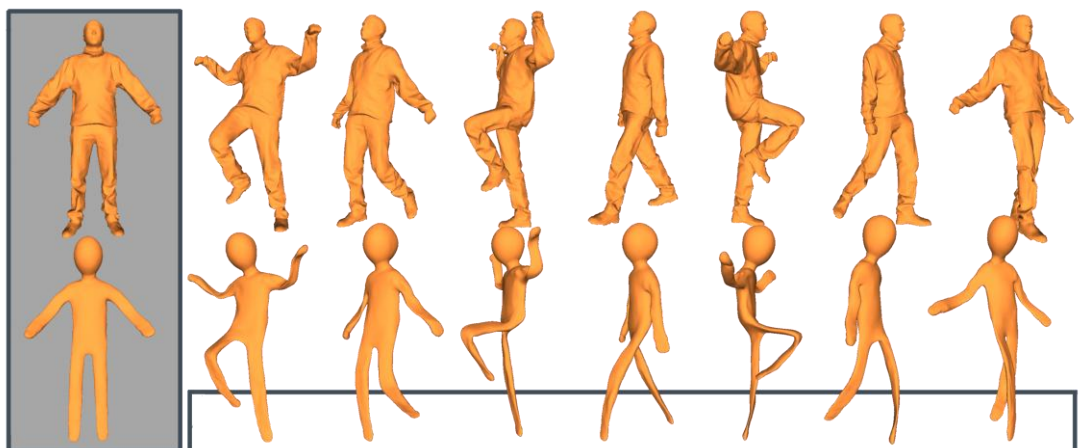
Οι παραδοσιακές μέθοδοι για την παραγωγή μιας πόζας ενός σκελετικού αντικειμένου από την κίνηση ενός αρχικού μοντέλου, κατασκευάζουν το σκελετό που ορίζεται από τα προεξέχοντα χαρακτηριστικά. Από την κίνηση των τμημάτων του σκελετού του τελικού σύμφωνα με τον αρχικό σκελετό, τα σημεία που αυτά ελέγχουν μετασχηματίζονται κατάλληλα και έτσι μεταβάλλουν το σχήμα του. Η Μεταφορά Παραμόρφωσης αντίθετα, χωρίς να κατασκευάσει καμία επιπλέον δομή μετασχηματίζει κάθε τρίγωνο της επιφάνειας αντιγράφοντας την αλλαγή του σχήματος και της κατεύθυνσης των αντίστοιχων αρχικών.



Σχήμα 2.6 Μεταφορά των Παραμορφώσεων από τη Γάτα στο Λιοντάρι.



Σχήμα 2.7 Παραγωγή των Ποζών του Σκύλου από την Παραμόρφωση της Γάτας.

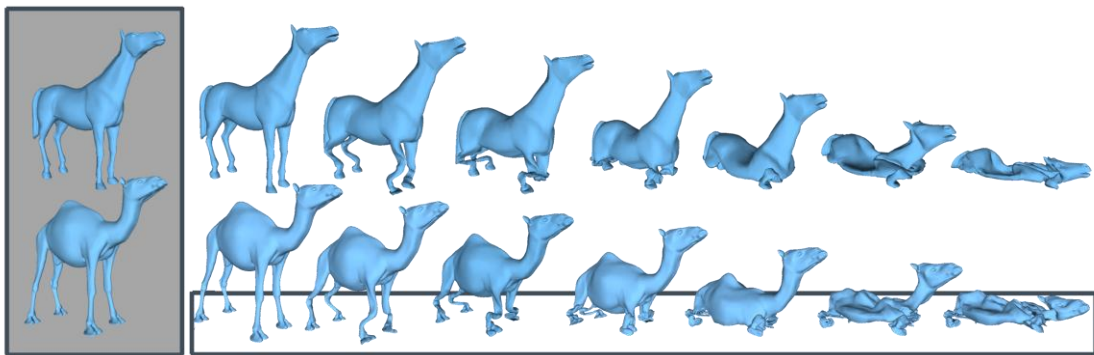


Σχήμα 2.8 Παραγωγή της ακολουθίας του Human όπως ορίζεται από τον Crane.

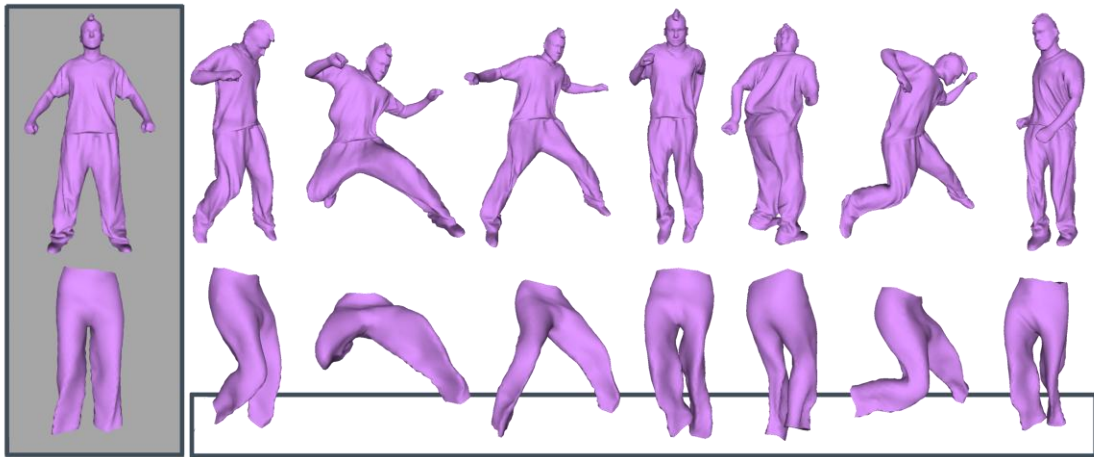
2.5.2. Παραμορφώσεις Ελεύθερης Μορφής

Εκτός από το χειρισμό των παραμορφώσεων που προκύπτουν από τις άκαμπτες παραμορφώσεις των προεξεχόντων χαρακτηριστικών για τα σκελετικά μοντέλα, η μέθοδος έχει σχεδιαστεί ώστε να ανταπεξέρχεται και στις περιπτώσεις των παραμορφώσεων ελεύθερης μορφής. Το παράδειγμα του Σχήματος 2.9 ανήκει σε αυτήν την κατηγορία αφού απεικονίζει ένα άλογο που ξεφουσκώνει και καταρρέει λόγω της βαρύτητας. Όταν η παραμόρφωση του Αλόγου εφαρμόστηκε στο μοντέλο της Καμήλας, η αλλαγή στην επιφάνειά της ανταποκρίθηκε άριστα στη αρχική ακολουθία και τα αποτελέσματα εκτός ότι αντιγράφουν τα αντίστοιχα αρχικά, είναι λογικά για το ίδιο το μοντέλο. Αν και απαιτείται μεγάλη μεταβολή της επιφάνειας, το σύστημα γραμμικών εξισώσεων που λύνεται για την κατασκευή μιας πόζας, τοποθετεί τις κορυφές στις κατάλληλες σχετικές τους θέσεις διατηρώντας έτσι τις ιδιότητες της επιφάνειας της πόζας αναφοράς.

Όπως είδαμε η Μεταφορά Παραμόρφωσης ανταποκρίνεται με τον ίδιο τρόπο και για τις δύο κατηγορίες παραμορφώσεων. Η διαδικασία που ακολουθεί για να κωδικοποιήσει την αρχική μεταβολή και να την αναπαράγει στο τελικό σχήμα είναι η πάντα η ίδια και στηρίζεται αποκλειστικά στην επιφάνεια. Συνεπώς, θα μπορούσαμε να συμπτύξουμε τις δύο κατηγορίες σε μία και να θεωρήσουμε ότι κάθε παράδειγμα είναι μια παραμόρφωση ελεύθερης μορφής.



Σχήμα 2.9 Αναπαραγωγή του εφέ του ξεφουσκώματος από την καμήλα.



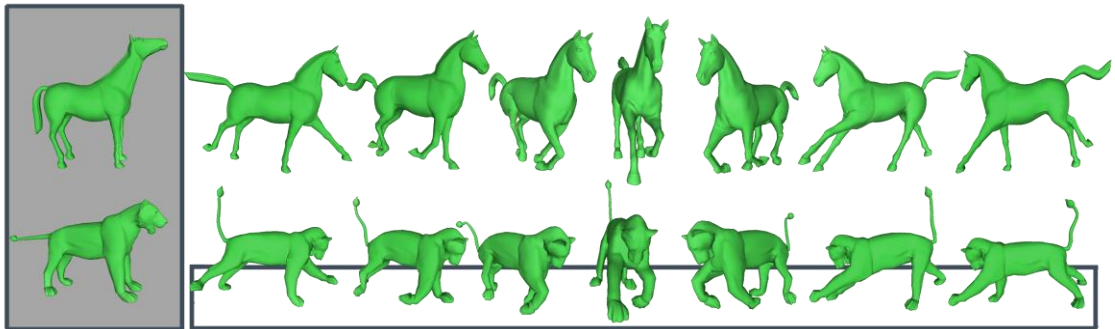
Σχήμα 2.10 Μεταφορά της Παραμόρφωσης για Διαφορετικά Μοντέλα.

2.5.3. Ευέλικτη Μεταφορά

Σε όλα τα προηγούμενα παραδείγματα η συσχέτιση μεταξύ των μοντέλων είναι ξεκάθαρη αφού οι πόζες αναφοράς τους είναι παρόμοιες. Έτσι, κατά τη διαδικασία της μεταφοράς των παραμορφώσεων όλα τα τμήματα από τις δύο επιφάνειες συμμετέχουν ενεργά. Στο Σχήμα 2.10 βλέπουμε ένα ζεύγος αντικειμένων που δεν ακολουθεί αυτό το μοτίβο. Το ρόλο του αρχικού αντικειμένου έχει ο χαρακτήρας Bouncing η ακολουθία του οποίου έχει προκύψει από ένα σύστημα motion capture. Το τελικό μοντέλο όμως δεν ακολουθεί τη δομή του, αφού αναπαριστά ένα παντελόνι και όπως γίνεται αντιληπτό ο αριθμός των προεξεχόντων χαρακτηριστικών μεταξύ τους διαφέρει. Ακόμη, η επιφάνεια του χαρακτήρα είναι κλειστή, ενώ το παντελόνι είναι ανοιχτό και στο πάνω και στο κάτω μέρος του.

Παρόλο που τα δύο μοντέλα δεν είναι όμοια όταν αντιμετωπίζονται σαν σύνολο, η μεταφορά παραμόρφωσης εκμεταλλεύεται την ουσιαστική πληροφορία που πηγάζει από το σχήμα τους. Δηλαδή, για να μετασχηματιστεί το μοντέλο του Παντελονιού έχοντας ως πρότυπο την ακολουθία του Bouncing, αρκεί να συσχετιστεί με τα κάτω άκρα του. Η μέθοδος που περιγράφουμε στο επόμενο κεφάλαιο για τη συσχέτιση δύο μοντέλων, μπορεί να χειριστεί τέτοιου είδους διαφορές και στο συγκεκριμένο παράδειγμα απλά αγνοεί τα υπόλοιπα τμήματα του αρχικού. Με την αντιστοιχία ως δεδομένη, η μεταφορά των παραμορφώσεων γίνεται με τον συνήθη τρόπο, αφού για

την παραγωγή μιας πόζας λαμβάνονται υπόψη μόνο τα deformation gradients των τριγώνων από τα κάτω άκρα.



Σχήμα 2.11 Παραγωγή Animation από Διαφορετικές Πόζες Αναφοράς.

2.5.4. Περιορισμοί

Παρά το γεγονός ότι το κίνητρο της Μεταφοράς Παραμόρφωσης είναι η γενικότητα, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να κάνει υποθέσεις, η εφαρμογή της είναι βασισμένη σε δύο προϋποθέσεις. Η πρώτη είναι η σημασιολογική ομοιότητα μεταξύ της πόζας αναφοράς των δύο μοντέλων και η δεύτερη είναι η φυσική συσχέτιση αυτού του οποίου αναπαριστούν. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.11 απεικονίζεται η μεταφορά της παραμόρφωσης από το Άλογο που καλπάζει στο Λιοντάρι. Συγκρίνοντας κάθε ζεύγος από πόζες, δίνεται η εντύπωση πως η μεταφορά δεν έγινε σωστά. Ενώ η ουρά του Αλόγου θα λέγαμε ότι έχει οριζόντια κατεύθυνση καθώς ταυτόχρονα καλπάζει, στο Λιοντάρι η κατεύθυνσή της είναι κάθετη. Αυτό όμως δεν οφείλεται σε λανθασμένη μεταφορά των μετασχηματισμών αλλά στο γεγονός ότι στις πόζες αναφοράς η κατεύθυνσή τους είναι διαφορετική. Επίσης, ο τρόπος που το Λιοντάρι αντιγράφει τον καλπασμό δεν ανταποκρίνεται στον τρόπο που ένα πραγματικό λιοντάρι τρέχει, παράγοντας ακαλαίσθητα αποτελέσματα. Δηλαδή η εφαρμογή της Μεταφοράς Παραμόρφωσης δεν ικανοποιεί τις σημασιολογικές κινήσεις των μοντέλων, όπως για παράδειγμα στο [6] αλλά αντιγράφει την παραμόρφωση.

Επιπλέον, επειδή η μέθοδος εφαρμόζει τα deformation gradients των τριγώνων του αρχικού στα αντίστοιχα τρίγωνα του τελικού, η πληροφορία μικρών τμημάτων της

επιφάνειας του πρώτου μοντέλου μεταφέρεται στην επιφάνεια του δεύτερου. Με αυτόν τον τρόπο είναι πιθανόν στο τελικό μοντέλο να ενσωματωθούν χαρακτηριστικά του πρώτου. Στο Σχήμα 2.8 το αρχικό μοντέλο αναπαριστά έναν άνθρωπο τα ρούχα του οποίου έχουν έντονες πτυχές. Καθώς περπατάει οι πτυχές μεταβάλλονται πολύ, με αποτέλεσμα το τελικό μοντέλο εκτός από τη συνολική αναπαραγωγή της κίνησης να αντιγράφει και τη μεταβολή τους. Αυτό τελικά σημαίνει πως ενώ στην πόζα αναφοράς το σώμα του είναι λείο, στα παραγόμενα αποτελέσματα δημιουργούνται μικρά τσαλακώματα. Βέβαια, το πρόβλημα θα μπορούσε να λυθεί με εκ των υστέρων επεξεργασία, παρόμοια με το [5] για την επαναφορά της αρχική κατάστασης.

Καταλήγοντας, για την κατασκευή μιας πόζας η μέθοδος βρίσκει τους κατάλληλους μετασχηματισμούς που πρέπει να εφαρμοστούν στα τρίγωνα του τελικού ώστε να αντιγράφουν τη μεταβολή των αντίστοιχων αρχικών. Αφού δεν θέτουμε κανέναν άλλον περιορισμό, η επιφάνεια μπορεί μετασχηματιστεί με αυθαίρετο τρόπο. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να υπάρξουν περιπτώσεις κατά τις οποίες τμήματα από την επιφάνεια μπορεί να τέμνονται μεταξύ τους, όπως συμβαίνει με την ουρά του Σκύλου στις δύο τελευταίες πόζες του Σχήματος 2.7.

2.5.5. Χρόνοι Εκτέλεσης

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση της αξιοποίησης όλων των πόρων ενός συστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση της κάρτας γραφικών για εκτέλεση πράξεων γραμμικής άλγεβρας και επίλυση συστημάτων, αφού ο σκοπός για τον οποίο έχει κατασκευαστεί είναι προσανατολισμένος σε αυτά. Το πλεονέκτημά της έναντι του επεξεργαστή είναι η αυτόματη παραλληλοποίηση και η αποδοτική εκτέλεση όταν ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος.

Όπως προαναφέραμε, η υλοποίηση του γραμμικού συστήματος για την κατασκευή μιας πόζας έγινε και στις δύο συσκευές. Επειδή όμως ο προγραμματισμός της κάρτας γραφικών δεν μετρά πολλά χρόνια ύπαρξης (η χρήση της CUDA από το κοινό άρχισε το 2007), δεν θα ασχοληθούμε με τους χρόνους εκτέλεσης από τον επεξεργαστή αλλά θα σχολιάσουμε μόνο την απόδοση της κάρτας. Για την υλοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήσαμε τη βιβλιοθήκη CUSP και η επίλυσή του έγινε με την εκτέλεση

ενός επαναληπτικού αλγορίθμου αφού πρώτα στον πίνακα κάναμε preconditioning. Στον Πίνακα 2.2 είναι συγκεντρωμένοι οι χρόνοι που χρειάστηκαν για την κατασκευή των αποτελεσμάτων για κάθε παράδειγμα. Η πρώτη στήλη αναφέρεται στη διάσταση του συστήματος, η δεύτερη στο μέσο χρόνο εκτέλεσης για κάθε συνιστώσα των συντεταγμένων και η τρίτη στο χρόνο για το preconditioning. Το πλήθος των δομικών συστατικών για όλα τα μοντέλα φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Δεδομένα Μοντέλων

Μοντέλο	Κορυφές	Τρίγωνα
Γάτα	7207	14410
Λιοντάρι	5000	9966
Σκύλος	26880	63474
Άλογο	8431	16843
Καμήλα	21887	43814
Παντελόνι	1453	2859
Crane	10002	20000
Bouncing	10002	20000
Human	9800	18500
Φόρμα	91683	182976

Εξετάζοντας τον Πίνακα 2.2 και το γράφημα του Σχήματος 2.12 που δείχνει τη σχέση της διάστασης και χρόνου εκτέλεσης, προκύπτουν κάποια συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της επίλυσης του συστήματος. Καταρχάς, να υπενθυμίσουμε ότι η διάσταση του συστήματος ισούται με το άθροισμα του πλήθους των κορυφών και των τριγώνων του τελικού μοντέλου. Όπως παρατηρούμε στο γράφημα, η διάσταση του συστήματος επηρεάζει το χρόνο που απαιτείται για την εύρεση της λύσης αλλά θα ήταν λάθος να εξεταστεί μεμονωμένα. Αυτό αποδεικνύεται και από το τελευταίο παράδειγμα του Παντελονιού και της Φόρμας. Σε αυτό, η Φόρμα δεν είναι τίποτε άλλο από το ίδιο το μοντέλο του Παντελονιού με μεγαλύτερη ανάλυση, δηλαδή περισσότερα σημεία και τρίγωνα. Έτσι, τα αποτελέσματα οπτικά είναι σχεδόν ίδια με τα αρχικά και αυτός είναι ο λόγος που δεν συμπεριλάβαμε κάποιο σχήμα που να τα απεικονίζει. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ο μέσος χρόνος για την εύρεση μιας συνιστώσας των συντεταγμένων, είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο χρόνο για το

παράδειγμα της Γάτας και του Σκύλου, αν και η διάσταση του δεύτερου ισούται με το 1/3 του πρώτου.

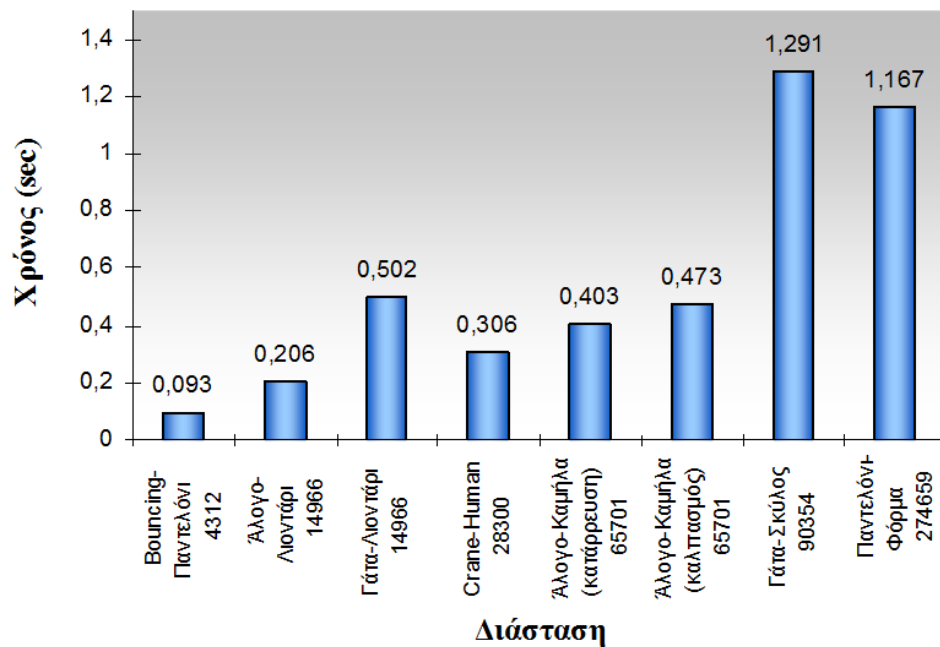
Πίνακας 2.2 Χρόνος Εκτέλεσης για τη Μεταφορά Παραμόρφωσης.

Παράδειγμα	Διάσταση $n \times n$	Μ.Ο για κάθε συνιστώσα (sec)	Preconditioning (sec)
Άλογο-Καμήλα (καλπασμός)	$n = 65701$	0.403	0.362
Γάτα-Λιοντάρι	$n = 14966$	0.502	0.087
Γάτα-Σκύλος	$n = 14966$	1.29	0.55
Crane-Human	$n = 28300$	0.306	0.181
Άλογο-Καμήλα (κατάρρευση)	$n = 65701$	0.473	0.362
Bouncing-Παντελόνι	$n = 4312$	0.093	0.027
Άλογο-Λιοντάρι	$n = 14966$	0.206	0.084
Παντελόνι-Φόρμα	$n = 274659$	1.167	1.35

Προσπαθώντας να εξηγήσουμε αυτή τη συμπεριφορά καταλήγουμε σε ένα δεύτερο συμπέρασμα, ότι δηλαδή το ποσοστό μεταβολής της επιφάνειας έχει σημασία. Στο παράδειγμα της Φόρμας τα δύο μοντέλα είναι σχηματικά όμοια. Αυτό σημαίνει ότι τα deformation gradients που εφαρμόζονται στα τρίγωνά της προκαλούν ομοιόμορφη μεταβολή στο μοντέλο. Έτσι η τοποθέτηση των κορυφών στις σχετικές τους θέσεις, ώστε να πληρείται η συνέχεια της επιφάνειας, είναι πιο εύκολη συγκριτικά με την περίπτωση του Σκύλου, το μοντέλο του οποίου διαφέρει από αυτό της γάτας. Βέβαια, παρατηρούμε πως αν και η ομοιότητα της Καμήλας με το Άλογο είναι η ίδια και για το παράδειγμα του καλπασμού και της κατάρρευσης ο χρόνος για το δεύτερο παράδειγμα είναι μεγαλύτερος από ότι για το πρώτο. Αυτό όμως επιβεβαιώνει το συμπέρασμα της μεταβολής της επιφάνειας, αφού όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 2.9 για να αντιγράψει η Καμήλα την κατάρρευση, η επιφάνειά της παραμορφώνεται έντονα.

Τέλος, σημαντικός είναι και ο τρόπος επίλυσης των συστημάτων. Επειδή ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε είναι επαναληπτικός, απαιτεί μια αρχική εκτίμηση της λύσης. Όταν η ακολουθία από πόζες του αρχικού αναπαριστά μια συνεχή κίνηση,

η εκτίμηση είναι οι τιμές των κορυφών της πόζας του τελικού που μόλις κατασκευάστηκε. Έτσι ο αλγόριθμος εκτελεί λιγότερο αριθμό επαναλήψεων. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το παράδειγμα του Λιονταριού που όταν αντιγράφει την ακολουθία της Γάτας, η οποία δεν είναι συνεχής αλλά ξεχωριστές πόζες, χρειάζεται περισσότερο χρόνο από ότι για να αντιγράψει τον καλπασμό του Αλόγου.



Σχήμα 2.12 Διάγραμμα Σχέσης Διάστασης Συστήματος - Χρόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ

3.1 Αλγόριθμος

3.2 Κατασκευή Ζευγών Αντιστοιχίας

3.3 Αποτελέσματα

Η παραμόρφωση της επιφάνειας ενός τελικού μοντέλου καθοδηγείται από τους μετασχηματισμούς πάνω στην επιφάνεια του αρχικού μοντέλου μέσω μιας αντιστοιχίας μεταξύ τους. Συνήθως η μορφή των αντικειμένων διαφέρει αφού ένα μοντέλο μπορεί να έχει αυθαίρετο σχήμα. Σε περιπτώσεις όπου δύο μοντέλα έχουν βασικές διαφορές, η αντιστοιχία μεταξύ τους δεν είναι προφανής αφού για παράδειγμα μπορεί να μοιράζονται διαφορετικό αριθμό προεξεχόντων χαρακτηριστικών ή να ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή τους. Ακόμη όμως και στην περίπτωση που τα δύο μοντέλα είναι όμοια ως προς τα χαρακτηριστικά, ο τρόπος που αυτά κωδικοποιούνται σε κάθε ένα επηρεάζει τη συσχέτισή τους. Η αντιστοιχία δηλαδή μεταξύ δύο μοντέλων δεν είναι μοναδική και γι αυτό το λόγο καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η μεταφορά των μετασχηματισμών. Συνεπώς, ο ρόλος της είναι πολύ σημαντικός για τα παραγόμενα αποτελέσματα.

Επειδή όμως το πρόβλημα της αντιστοιχίας μεταξύ δύο αντικειμένων είναι πολύ βασικό και συναντάται συχνά σε διάφορους τομείς των γραφικών, πολλές μέθοδοι έχουν προταθεί που προσπαθούν να το επιλύσουν. Κάθε μία από αυτές στοχεύει στην επίλυση όσο το δυνατόν περισσότερων περιπτώσεων, αλλά η τελική αποτίμηση είναι πως καμία μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για το πλήθος των πιθανών συνδυασμών. Επίσης, κάποιες τεχνικές παραμετροποιούν τα μοντέλα βασισμένες στην υπόθεση ότι τα δύο αντικείμενα είναι του ίδιου γένους (genus) και η επιφάνειες τους δεν περιέχουν σφάλματα (είναι δηλαδή manifold). Έτσι, μια μέθοδος για την παραγωγή της αντιστοιχίας μεταξύ δύο μοντέλων πρέπει να ξεπερνά τέτοιους περιορισμούς, ώστε η εφαρμογή της να είναι κατάλληλη σε ένα ευρύ φάσμα συνδυασμών.

Βασισμένοι στη διαδικασία της μεταφοράς των μετασχηματισμών, όπως περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο και στο κίνητρο της ευρείας εφαρμογής, παρουσιάζουμε μια μεθοδολογία καθοδηγούμενη από το χρήστη που ως αποτέλεσμα παράγει ζεύγη τριγώνων από τα δύο αντικείμενα. Η μέθοδος προϋποθέτει ένα πλήθος M από ζεύγη σημείων δεικτών επιλεγμένα πάνω στα δύο μοντέλα.

$$M = \{(v_i, v_j)_1, \dots, (v_i, v_j)_{|M|}\}. \quad \text{Εξ. 3.1}$$

Κάθε ζεύγος (v_i, v_j) αποτελείται από μία κορυφή v_i του αρχικού μοντέλου και μια κορυφή v_j του τελικού και δηλώνει τη συσχέτιση μεταξύ τους. Το πλήθος του M είναι αυθαίρετο και ακόμα και για μεγάλη ανάλυση ισούται με μερικές δεκάδες.

Όπως περιγράψαμε στην Ενότητα 2.2 στόχος της μεθόδου είναι η συσχέτιση όλων των τριγώνων του τελικού μοντέλου με τρίγωνα από το αρχικό ώστε τα ζεύγη τους να καθορίζουν την εφαρμογή των αρχικών deformation gradients. Στο σύνολο C ένα τρίγωνο μπορεί γενικά να συμμετέχει σε περισσότερα από ένα ζεύγη. Με αυτό τον τρόπο η Μεταφορά Παραμόρφωσης εκτός από τον περιορισμό της διαφορετικής ανάλυσης των επιφανειών ξεπερνά και τη διαφορετική δομή των μοντέλων. Καθώς η αντιστοιχία ορίζεται στα δομικά συστατικά του μοντέλου, ακόμη και σε περιπτώσεις που το τελικό μοντέλο έχει μικρότερο αριθμό προεξεχόντων χαρακτηριστικών σε σχέση με το αρχικό, η μέθοδος καταφέρνει να κατασκευάσει το σύνολο C αγνοώντας τα επιπλέον χαρακτηριστικά.

$$C = \{(i, j)_1, \dots, (i, j)_{|C|}\}. \quad \text{Εξ. 3.2}$$

Στόχος της μεθόδου είναι να μετασχηματίσει την επιφάνεια του τελικού αντικειμένου ώστε να ταιριάζει όσο το δυνατόν καλύτερα στην επιφάνεια του αρχικού. Εφόσον κάτι τέτοιο καταστεί εφικτό, είναι πλέον εύκολο να προκύψει μια αντιστοιχία μεταξύ των τριγώνων. Η μέθοδος είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος εύρεσης κοντινότερων σημείων σε επιφάνεια, με περιορισμούς τις κορυφές από τα ζεύγη του

συνόλου των δεικτών του M . Τελικά, συγκρίνοντας τα κέντρα βάρους των τριγώνων με κάποια κριτήρια, λαμβάνουμε το σύνολο των ζευγών αντιστοιχίας.

3.1. Αλγόριθμος

Η προσαρμογή των μοντέλων προκύπτει από τη λύση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης ενέργειας παρόμοιο με το πρόβλημα που περιγράφηκε στην ενότητα της μεταφοράς των μετασχηματισμών. Αντίθετα όμως με πριν, η αντικειμενική συνάρτηση είναι σχεδιασμένη ώστε να μετασχηματίσει την επιφάνεια του τελικού μοντέλου σε αυτήν του αρχικού και όχι να την παραμορφώσει σύμφωνα με αυτήν. Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης αποτελείται από τρεις όρους, τους E_S , E_I και E_C , από το συνδυασμό των οποίων επιτυγχάνεται η επιθυμητή μεταβολή. Ο πρώτος όρος είναι υπεύθυνος ώστε η επιφάνεια να μην έχει απότομες μεταβολές, ο δεύτερος αποτρέπει την υπερβολική ομαλότητά της σε περιοχές που κάτι τέτοιο θα αλλοίωνε τη μορφή της εξαιτίας του E_S και τέλος ο τρίτος είναι αυτός που μετατοπίζει τις κορυφές του τελικού ώστε ιδανικά να ταιριάζουν στα κοντινότερα σημεία πάνω στην επιφάνεια του αρχικού. Και οι τρεις όροι έχουν τον περιορισμό πως για κάθε ζεύγος από δείκτες του M , κάθε σημείο του τελικού μετασχηματίζεται ακριβώς στο σημείο που καθορίζει η αντίστοιχη κορυφή του αρχικού. Αναλύοντας κάθε όρο του προβλήματος ελαχιστοποίησης θα καταλήξουμε στη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης και στον τρόπο επίλυσης της μέσα από μια επαναληπτική μέθοδο.

Όπως προαναφέραμε, ο όρος E_S είναι υπεύθυνος ώστε η επιφάνεια που προκύπτει να είναι ομαλή. Δηλαδή αν υποθέσουμε ότι κινούμαστε πάνω της, να μην συναντάμε απότομες μεταβολές. Αυτό σημαίνει ότι οι μετασχηματισμοί μεταξύ γειτονικών τριγώνων δε διαφέρουν πολύ. Όμοια με την διαδικασία της μεταφοράς θεωρούμε το πλήθος $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ των ιδανικών deformation gradients που μετασχηματίζουν την επιφάνεια. Έχουμε:

$$E_S(\tilde{v}_1 \dots \tilde{v}_n) = \sum_{i=1}^m \sum_{j \in \text{adj}(i)} \|T_i - T_j\|_F^2 \quad \text{Εξ. 3.3}$$

όπου m είναι το πλήθος των τριγώνων του τελικού μοντέλου και ως $adj(i)$ δηλώνουμε το σύνολο των τριγώνων που μοιράζονται μία τουλάχιστον κορυφή με το τρίγωνο i . Ο όρος E_S ελαχιστοποιείται όταν η μεταβολή της επιφάνειας και όχι η ίδια η επιφάνεια, είναι ομαλή.

Ο σκοπός που συμπεριλαμβάνεται στη λύση ο όρος E_I , είναι για να αποτραπεί η αλλοίωση του σχήματός της εξαιτίας του όρου E_S . Αν δεν τον λάβουμε υπόψη, υπάρχει ο κίνδυνος η μετασχηματισμένη επιφάνεια να είναι υπερβολικά ομαλή και να μην ακολουθεί την κυρτότητα της επιφάνειας του αρχικού μοντέλου.

$$E_I(\tilde{v}_1 \dots \tilde{v}_n) = \sum_{i=1}^m \|T_i - I\|_F^2. \quad \text{Εξ. 3.4}$$

Ο E_I ελαχιστοποιείται όταν τα deformation gradients T_i των τριγώνων ισούνται με τον μοναδιαίο πίνακα. Αυτό σημαίνει πως καθώς το σύστημα επιλύεται, ο όρος E_I δεν επιτρέπει σε ένα τρίγωνο να μεταβληθεί πολύ σε σχέση με την προηγούμενη κατάστασή του ισοσκελίζοντας με αυτόν τον τρόπο το ποσοστό αρνητικής επίδρασης του E_S στην επιφάνεια.

Τέλος, ο όρος E_C ορίζει ότι ιδανικά, οι νέες συντεταγμένες κάθε κορυφής του τελικού θα πρέπει να είναι οι συντεταγμένες του κοντινότερου σημείου της πάνω στην επιφάνεια του αρχικού. Δηλαδή:

$$E_C(\tilde{v}_1 \dots \tilde{v}_n) = \sum_{i=1}^n \|\tilde{v}_i - c_i\|_F^2 \quad \text{Εξ. 3.5}$$

όπου $c_1 \dots c_n$ είναι τα κοντινότερα σημεία για όλες τις κορυφές $\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n$ αντίστοιχα. Τα κοντινότερα σημεία c_i πάνω σε ένα τρίγωνο δεν συμμετέχουν στους αγνώστους για το πρόβλημα ελαχιστοποίησης και υπολογίζονται ελέγχοντας τη γωνία μεταξύ των normal της κορυφής του τελικού μοντέλου και του υποψήφιου τριγώνου. Αν η γωνία είναι μικρότερη από 90° τότε το σημείο είναι αποδεκτό. Ο E_C είναι ο όρος που

παράγει τη λεπτομέρεια στη μετασχηματισμένη επιφάνεια και την οδηγεί στο να πλησιάσει την επιφάνεια του αρχικού.

Για να επιτύχουμε τη μεταβολή της επιφάνειας συνδυάζουμε τους τρεις όρους στο παρακάτω πρόβλημα ελαχιστοποίησης:

$$\min_{\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_n} w_S E_S + w_I E_I + w_C E_C \quad \text{Εξ. 3.6}$$

ώστε $\tilde{v}_i = \tilde{v}_j, \quad \forall (i, j)_r, \quad r \in 1 \dots |M|$

όπου τα w_S , w_I και w_C είναι βάρη. Για να φτάσουμε στη επιθυμητή λύση ακολουθούμε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο πέντε βημάτων που θεωρεί την αντικειμενική συνάρτηση με γνωστά βάρη σε κάθε βήμα. Το συνολικό πρόβλημα μπορεί να υποδιαιρεθεί σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση λύνουμε το πρόβλημα αγνοώντας τον όρο E_C , (θεωρούμε το βάρος του $w_C = 0$). Με αυτόν τον τρόπο παίρνουμε μια αρχική προσέγγιση του σχήματος του αρχικού μοντέλου, αφού η επιφάνεια μετασχηματίζεται σύμφωνα με τους δύο πρώτους όρους, που μετακινούν τις κορυφές της βάση των περιορισμών. Επειδή οι περιορισμοί ορίζονται από τους δείκτες, σημαίνει πως η νέα θέση για κάθε κορυφή του τελικού μοντέλου που συμμετέχει σε έναν δείκτη, ταιριάζει απόλυτα με τη θέση της κορυφής του αρχικού μοντέλου στο δείκτη. Για τα βάρη w_S και w_I δίνουμε τιμές 1.0 και 0.001 αντίστοιχα, που είναι ένας καλός συνδυασμός για την επίτευξη της κατάλληλης ομαλότητας για την επιφάνεια .

Η εφαρμογή των δύο πρώτων όρων στο τελικό μοντέλο προκαλούν τέτοια παραμόρφωση στην επιφάνειά του, ώστε το σχήμα του θεωρείται ως μια πρώτη προσέγγιση του αρχικού αντικειμένου. Έτσι, στη δεύτερη φάση της μεθόδου επαναληπτικά βελτιώνουμε την προσέγγιση αυτή, ώστε τελικά το μετασχηματισμένο τελικό και το αρχικό μοντέλο να συμπίπτουν όσο το δυνατό πιο ικανοποιητικά. Αφού οι κορυφές της επιφάνειας έχουν πλέον μετασχηματιστεί σύμφωνα με τους περιορισμούς, οι νέες θέσεις τους βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του αρχικού, επιτρέποντας έτσι την εύρεση των κοντινότερων σημείων τους πάνω σε αυτή. Τα κοντινότερα σημεία λειτουργούν πλέον ως είσοδος για τον όρο E_C , το βάρος του

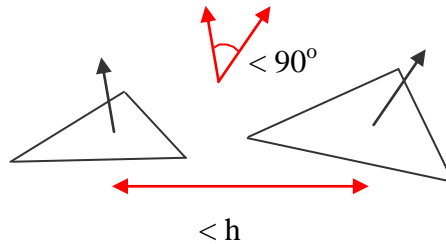
οποίου w_C θέτουμε ίσο με 1.0. Έτσι, ενεργοποιούμε τη συμμετοχή του στην αντικειμενική συνάρτηση και ξαναλύουμε το πρόβλημα. Ακολουθούμε την ίδια τακτική για τρεις ακόμη επαναλήψεις διατηρώντας τις τιμές για τα βάρη των δύο πρώτων όρων ($w_S = 1.0$ και $w_I = 0.001$) ενώ μεταβάλλουμε το βάρος του E_C . Συνολικά εκτελούμε τέσσερις επαναλήψεις για τη δεύτερη φάση, με τις τιμές του w_C ίσες με 1.0, 50.0, 500.0 και 5000.0 αντίστοιχα για κάθε επανάληψη. Η επίλυση του συστήματος έχει ως αποτέλεσμα την διαδοχική βελτίωση της προσέγγισης της επιφάνειας, με την διαφορά μεταξύ των αντικειμένων ύστερα από την ολοκλήρωση του αλγορίθμου να μην επηρεάζει ιδιαίτερα στη κατασκευή αποδεκτών ζευγών αντιστοιχίας. Το πρόβλημα της προσαρμογής των δύο μοντέλων είναι ένα τετραγωνικό πρόβλημα με γραμμικούς περιορισμούς το οποίο αναλύεται σε ένα σύστημα κανονικών εξισώσεων αντίστοιχα με το πρόβλημα της Μεταφοράς Παραμόρφωσης.

3.2. Κατασκευή Ζευγών Αντιστοιχίας

Έπειτα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας προσαρμογής, είναι έτοιμο το πλαίσιο για την κατασκευή του συνόλου των ζευγών αντιστοιχίας εξετάζοντας την απόσταση των κέντρων βάρους των τριγώνων καθώς και της διεύθυνσής τους. Όπως και στην εύρεση των κοντινότερων σημείων έτσι και εδώ περιορίζουμε τα πιθανά ζεύγη από τα ίδια κριτήρια. Δύο τρίγωνα είναι πιθανά για την κατασκευή ενός ζεύγους αν η απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους τους είναι μικρότερη από ένα δοθέν όριο και η γωνία που ορίζεται από τα normal τους είναι μικρότερη από 90° (Σχήμα 3.1). Με αυτό τον έλεγχο αποφεύγουμε τη συσχέτιση τριγώνων από περιοχές που βρίσκονται κοντά αλλά έχουν αντίθετες διευθύνσεις, όπως για παράδειγμα τα τρίγωνα που κατασκευάζουν τα χείλη ενός προσώπου.

Για κάθε τρίγωνο του τελικού μοντέλου ο αλγόριθμος επιλέγει ένα ή περισσότερα τρίγωνα από το αρχικό και προσθέτει τα ζεύγη στο σύνολο C . Στην περίπτωση κατά την οποία τα δύο μοντέλα διαφέρουν πολύ στη δομή, αντί να αυξήσουμε το όριο για την απόσταση των κέντρων βάρους θα μπορούσαμε να μη συμπεριλάβουμε στο C τα τρίγωνα του τελικού για τα οποία δεν πληρούνται οι περιορισμοί. Έτσι αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα της μη ύπαρξης αρχικού deformation gradient κατά τη

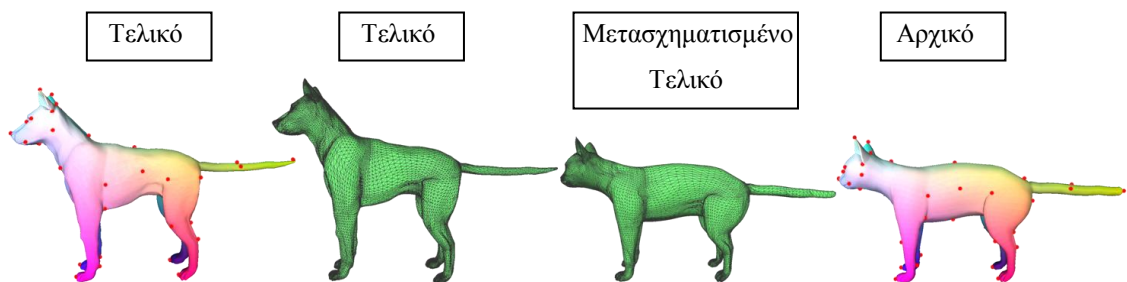
διαδικασία της μεταφοράς θεωρώντας τον μοναδιαίο 3×3 ως το αρχικό deformation gradient. Με αυτόν τον τρόπο τα τρίγωνα θα μετασχηματιστούν κατά το δυνατόν λιγότερο και δεν θα επηρεάσουν τα αποτελέσματα της διαδικασίας.



Σχήμα 3.1 Κριτήρια Κατασκευής Ζεύγους Αντιστοιχίας.

3.3. Αποτελέσματα

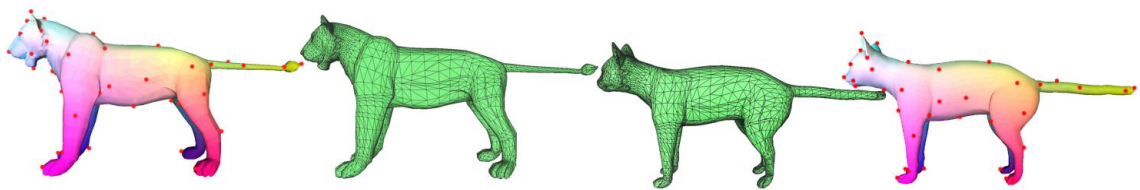
Ο τρόπος που η μέθοδος φτάνει στην αντιστοίχιση των δύο μοντέλων, δηλαδή στην συσχέτιση μεταξύ των τριγώνων τους, απεικονίζεται παρακάτω. Όπως είπαμε, για να φτάσουμε στην κατασκευή των ζευγών αρχικά πρέπει να ορίσουμε ένα πλήθος από δείκτες πάνω στις δύο επιφάνειες. Από την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης που περιγράψαμε παραπάνω, με περιορισμούς τους δείκτες, το τελικό μοντέλο μετασχηματίζεται ώστε το σχήμα του να ταιριάζει με το σχήμα του αρχικού.



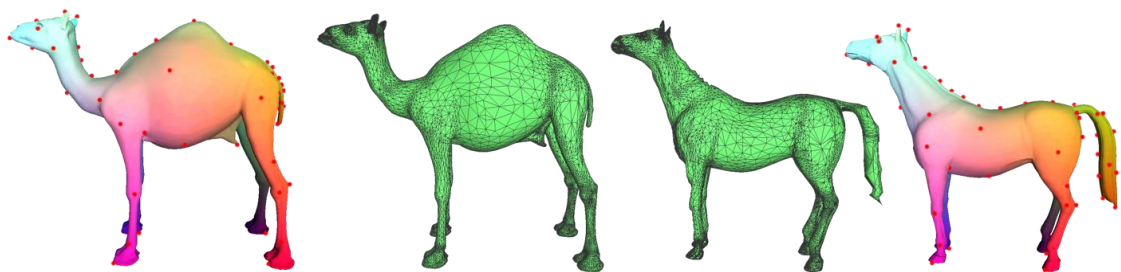
Σχήμα 3.2 Διαδικασία Συσχέτισης των Μοντέλων Σκύλου και Γάτας.

Σε όλα τα παραδείγματα απεικονίζουμε τη διαδικασία της αντιστοιχίας προβάλλοντας τα βασικά της στάδια. Το τελικό μοντέλο απεικονίζεται στα αριστερά του σχήματος ενώ το αρχικό στα δεξιά, στην επιφάνεια των οποίων φαίνονται οι κορυφές δείκτες.

Στο κέντρο κάθε σχήματος απεικονίζεται το σχήμα της επιφάνειας του τελικού μοντέλου, πριν και μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου. Η μετασχηματισμένη επιφάνεια είναι σχηματικά όμοια με την επιφάνεια του αρχικού και έτσι μπορούν να εφαρμοστούν τα κριτήρια για την κατασκευή των ζευγών αντιστοιχίας. Ο χρωματισμός των αντίστοιχων τριγώνων με το ίδιο χρώμα καθορίζει τη συνολική συσχέτιση των δύο μοντέλων, όπως φαίνεται από τα μοντέλα κάθε σχήματος. Για την απεικόνιση της αντιστοιχίας, καταρχάς αναθέσαμε ένα διαφορετικό χρώμα σε κάθε κορυφή του αρχικού. Το χρώμα που αντιστοιχεί σε κάθε κορυφή υπολογίζεται ως η κανονικοποιημένη ευκλείδεια απόσταση από το σημείο του bounding box του μοντέλου με τις μικρότερες τιμές των συντεταγμένων. Έτσι για κάθε τρίγωνο, το χρώμα προκύπτει ως ο μέσος όρος των τιμών r , g , b των κορυφών του. Με το χρώμα κάθε τριγώνου του αρχικού να έχει καθοριστεί, το χρώμα ενός τριγώνου του τελικού ισούται με το χρώμα ενός από τα τρίγωνα με τα οποία αντιστοιχίζεται.



Σχήμα 3.3 Αντιστοιχία Λιονταριού – Γάτας.

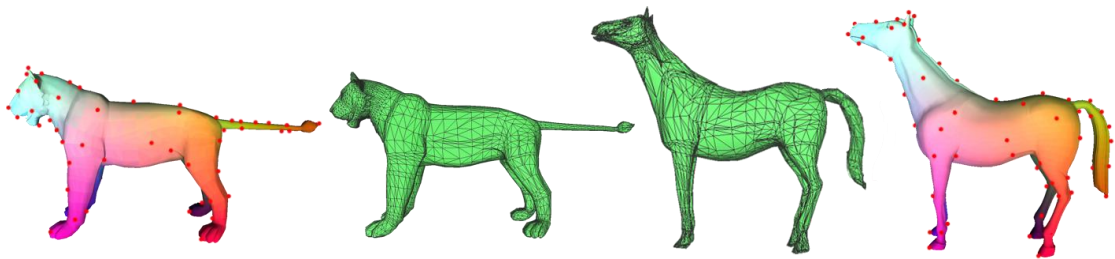


Σχήμα 3.4 Αντιστοιχία Καμήλας – Αλόγου.

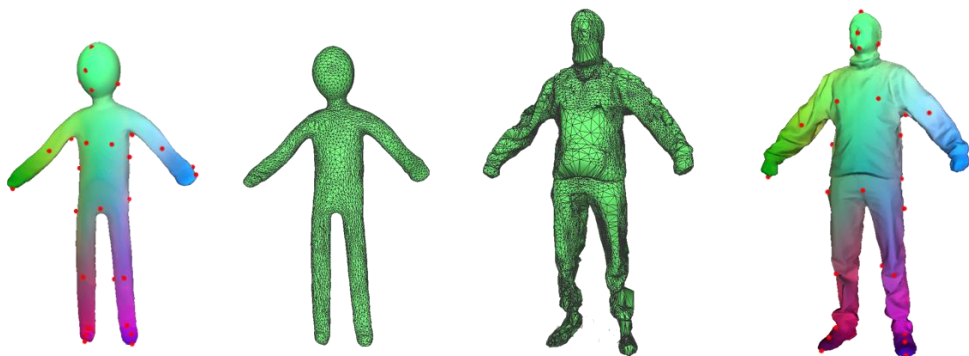
Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.2, 3.3 και 3.4, η μέθοδος μεταβάλλει ιδανικά την επιφάνεια του τελικού όταν τα δύο μοντέλα έχουν παρόμοια δομή. Επειδή τα τρίγωνα δεν δέχονται μεγάλες παραμορφώσεις ώστε στο σύνολό τους να ταιριάζουν με την

επιφάνεια του αρχικού, το σχήμα τους δεν αλλάζει ιδιαίτερα. Όταν τα δύο μοντέλα μπορούν να συσχετιστούν λογικά αλλά οι πόζες αναφοράς τους δεν είναι σημασιολογικά όμοιες, η μέθοδος καταφέρνει να μετασχηματίσει το τελικό αλλά πιθανώς να χρειαστεί μεγαλύτερος αριθμός από δείκτες. Στο παράδειγμα του Σχήματος 3.5 τα τρίγωνα της ουράς και του λαιμού του Λιονταριού πρέπει να δεχθούν έντονη παραμόρφωση για να ταιριάξουν με τα αντίστοιχα τμήματα του Αλόγου. Για αυτό το λόγο, στα συγκεκριμένα σημεία επιλέγουμε περισσότερους δείκτες ώστε να οδηγήσουμε την τελική παραμόρφωση.

Το παράδειγμα του Σχήματος 3.6 απεικονίζει μία περίπτωση στην οποία οι επιφάνειες των δύο μοντέλων έχουν διαφορά όσον αφορά τη λεπτομέρεια. Το τελικό μοντέλο του Human αναπαριστά έναν επίπεδο χαρακτήρα με ανθρώπινη δομή και απλοποιημένη επιφάνεια. Το μοντέλο του Crane αντίθετα έχει όγκο και η επιφάνειά του αναπαριστά πραγματικά ρούχα με έντονες πτυχές. Παρόλα αυτά, η μέθοδος δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα στην μεταβολή του σχήματος του Human και μάλιστα αναπαριστά αρκετά πειστικά τις πτυχές των ρούχων.



Σχήμα 3.5 Συσχέτιση Λιονταριού – Αλόγου.



Σχήμα 3.6 Αντιστοιχία Human – Crane.

Στα παραπάνω παραδείγματα, αν εξαιρέσουμε κάποιες μικρές διαφορές τα δύο μοντέλα έχουν παρόμοια μορφή. Στο Σχήμα 3.7 αυτό δεν ισχύει αφού το ρόλο του τελικού αντικειμένου έχει το Παντελόνι το οποίο είναι ανοιχτό και στην πάνω και στην κάτω πλευρά και το ρόλο του αρχικού ο Bouncing, η επιφάνεια του οποίου είναι κλειστή. Η γενικότητα της μεθόδου όμως ξεπερνά τέτοιου είδους διαφορές, αφού ουσιαστικά αρκεί απλά το Παντελόνι να συσχετιστεί με το τμήμα του παντελονιού του Bouncing. Δηλαδή, επειδή οι κορυφές του αρχικού μοντέλου που συμμετέχουν στους δείκτες επιλέγονται από το συγκεκριμένα τμήμα της επιφάνειας, η μέθοδος απλά αγνοεί το υπόλοιπο μοντέλο και μετασχηματίζει το τελικό σύμφωνα με αυτούς.



Σχήμα 3.7 Συσχέτιση Παντελονιού – Bouncing.

Όπως προκύπτει, η σωστή λειτουργία της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από την επιλογή και το πλήθος των δεικτών. Οι κορυφές που επιλέγονται για την κατασκευή του συνόλου των δεικτών δεν έχουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και μπορεί να ανήκουν σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας. Βέβαια για τη σωστή μεταφορά της παραμόρφωσης απαιτείται προσεκτική αντιστοιχία των τριγώνων που βρίσκονται σε περιοχές που στην αρχική ακολουθία παραμορφώνονται έντονα. Για παράδειγμα, η συσχέτιση των τριγώνων από τα πόδια του Αλόγου και της Καμήλας είναι πιο σημαντική από αυτή των τριγώνων από το κεφάλι, που μεταβάλλεται ελάχιστα στο animation. Για αυτό το λόγο, είναι προτιμότερο ο μεγαλύτερο αριθμός από δείκτες να επιλέγεται σε αυτές τις περιοχές. Η προσαρμογή του μοντέλου μπορεί να επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό, προσθέτοντας επιπλέον δείκτες στα σημεία που θέλουν βελτίωση. Στον Πίνακα 3.1 παραθέτουμε

τον τελικό αριθμό δεικτών που χρησιμοποιήσαμε σε κάθε παράδειγμα. Τα δεδομένα για όλα τα μοντέλα βρίσκονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.1 Αριθμός Δεικτών

Παράδειγμα	Δείκτες
Γάτα - Σκύλος	51
Γάτα - Λιοντάρι	79
Άλογο – Καμήλα	68
Άλογο - Λιοντάρι	81
Crane - Human	44
Bouncing - Παντελόνι	42

Πίνακας 3.2 Δεδομένα Μοντέλων

Μοντέλο	Κορυφές	Τρίγωνα
Γάτα	7207	14410
Λιοντάρι	5000	9966
Σκύλος	26880	63474
Άλογο	8431	16843
Καμήλα	21887	43814
Παντελόνι	1453	2859
Crane	10002	20000
Bouncing	10002	20000
Human	9800	18500

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ

4.1 Κωδικοποίηση Επεξεργασίας

4.2 Ενσωμάτωση Επεξεργασίας

4.3 Ανάλυση

4.4 Αποτελέσματα

Η παραγωγή animation που προσομοιώνουν φυσικές κινήσεις είναι μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί τόσο καλλιτεχνική ικανότητα όσο και τεχνικές γνώσεις. Η παραδοσιακή μέθοδος που ακολουθείται προβλέπει την επεξεργασία των σημείων μιας αρχικής πόζας, που συνήθως είναι η πόζα αναφοράς ώστε διαδοχικά να κατασκευαστεί το σύνολο των στιγμιότυπων. Συνήθως στο μοντέλο ορίζεται μια δομή, από την επεξεργασία της οποίας οδηγείται το σύνολο των σημείων που κατασκευάζουν την επιφάνεια. Η δημιουργία όμως ρεαλιστικών κινήσεων εκ του μηδενός είναι πολύ απαιτητική με την υιοθέτηση αυτής της τεχνικής. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί ένας σημαντικός αριθμός από εργασίες που κάνουν τη διαδικασία πιο εύκολη και τα αποτελέσματά της πιο πειστικά.

Εκτός όμως από την παραγωγή κινήσεων με διαδοχική επεξεργασία, ένα animation μπορεί να προκύψει από την ψηφιοποίηση της κίνησης μιας φυσικής οντότητας με ένα σύστημα motion capture, όπως συνηθίζεται στις μέρες μας. Επιπλέον, η εφαρμογή μιας πολύπλοκης συνάρτησης πάνω στα ίδια τα σημεία θα μπορούσε να κατασκευάσει ένα ρεαλιστικό αποτέλεσμα. Ένα παράδειγμα είναι η προσομοίωση μιας σημαίας που ανεμίζει. Γενικά, τα είδη των παραμορφώσεων που ορίζονται από ένα animation κατατάσσονται στις δύο μεγάλες κατηγορίες: στις σκελετικές παραμορφώσεις και στις παραμορφώσεις ελεύθερης μορφής.

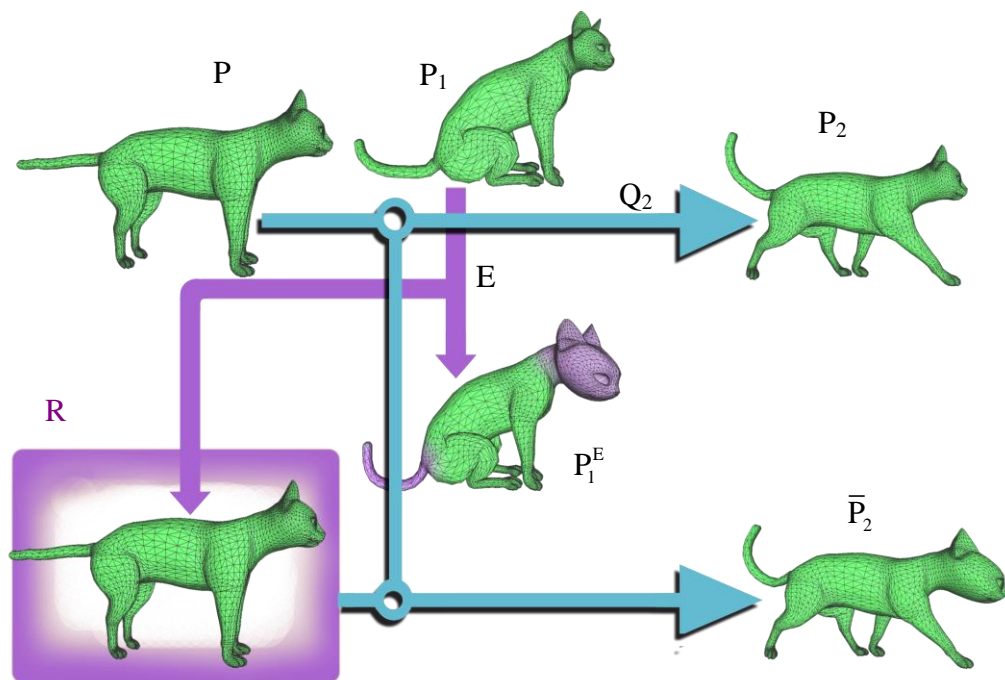
Αντίθετα με την κατασκευή ενός animation από μηδενική βάση και παρόμοια με την ιδέα της μεταφοράς του μετασχηματισμού, η επεξεργασία μιας υπάρχουσας ακολουθίας από πόζες ενός αντικειμένου είναι επίσης πολύ σημαντική και έχει πρακτική εφαρμογή. Ιδικά στην περίπτωση των ελεύθερων παραμορφώσεων η επεξεργασία της ακολουθίας ενός μοντέλου με τις συμβατικές τεχνικές είναι πολύ δύσκολη. Το μοντέλο ενός υφάσματος για παράδειγμα που έχει κατασκευαστεί για ένα συγκεκριμένο σκοπό είναι δύσκολο να μεταβληθεί ώστε να γίνει κατάλληλο για άλλες χρήσεις. Η περίπτωση των σκελετικών παραμορφώσεων αν και παρουσιάζει μεγαλύτερη ευκολία στην αντιμετώπιση βασικών αλλαγών στη δομή των αντικειμένων, εξισώνεται με την προηγούμενη κατηγορία όταν η επεξεργασία αφορά αλλαγές στην επιφάνεια του μοντέλου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η δημιουργία πτυχών στα ρούχα ενός ανθρώπου που περπατάει.

Η μέθοδος που παρουσιάζουμε για την επεξεργασία ενός animation βασίζεται στην ιδέα της μεταφοράς παραμόρφωσης και συνεπώς δεν κάνει διαχωρισμό των παραμορφώσεων. Σκοπός της Επεξεργασίας Ακολουθίας δεν είναι η ανάπτυξη του πλαισίου της επεξεργασίας αυτής κάθε αυτής, αλλά δεδομένης μιας παραμόρφωσης για μία πόζα να την ενσωματώσει στην υπόλοιπη ακολουθία. Η είσοδος της διαδικασίας, εκτός από την πόζα αναφοράς και την ακολουθία του μοντέλου αποτελείται και από την επεξεργασμένη εκδοχή μιας επιλεγμένης πόζας της ακολουθίας, ο τρόπος από τον οποίο έχει προκύψει δεν εξετάζεται από την μέθοδο και έτσι δεν την επηρεάζει. Για παράδειγμα η μεταβολή μπορεί να προέλθει από κάποιο εργαλείο σχεδίασης ή από την χρήση τεχνικών που έχουν προταθεί, όπως αυτή στη [18].

Ο τρόπος που η Επεξεργασία Ακολουθίας παράγει τη νέα ακολουθία ενός μοντέλου ώστε να ενσωματώνεται η επεξεργασία, βασίζεται στη μέθοδο που ακολουθήσαμε για τη μεταφορά των παραμορφώσεων. Όπως η Μεταφορά Παραμόρφωσης κατασκευάζει μια ακολουθία από πόζες μέσω της διαδοχικής εφαρμογής της, έτσι και η Επεξεργασία Ακολουθίας παράγει επαναληπτικά κάθε πόζα ώστε το σχήμα της να ενσωματώνει την παραμόρφωση. Μια διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στο γεγονός ότι στην επεξεργασία η μεταφορά των παραμορφώσεων εφαρμόζεται στο ίδιο μοντέλο και μετασχηματίζει έναν αριθμό από υπάρχουσες πόζες. Επειδή η

ακολουθία από πόζες ενός μοντέλου κατασκευάζεται από την αλλαγή της μορφής του, η συνδεσιμότητα των δομικών στοιχείων του (τρίγωνα) παραμένει αμετάβλητη και για αυτό το λόγο δεν υφίσταται θέμα αντιστοιχίας. Αντιθέτως, η κωδικοποίηση της επεξεργασίας και η ενσωμάτωσή της στην ακολουθία, είναι αντίστοιχη με την κωδικοποίηση και τη μεταφορά των μετασχηματισμών της Μεταφοράς Παραμόρφωσης.

Στο Σχήμα 4.1 φαίνονται τα βήματα που ακολουθεί η μέθοδος για την παραγωγή μιας πόζας. Την είσοδο αποτελούν η πόζα αναφοράς P που έχει το ρόλο αρχικού και τελικού ταυτόχρονα, η ακολουθία από πόζες P_1 και P_2 και η πόζα P_1^E η οποία είναι η επεξεργασμένη εκδοχή της P_1 . Η μέθοδος αρχικά κωδικοποιεί την παραμόρφωση E από την επεξεργασία και την αρχική παραμόρφωση Q_2 για την P_2 . Έπειτα οι μετασχηματισμοί E_i εφαρμόζονται στα αντίστοιχα τρίγωνα της P αλλάζοντας το σχήμα και την κατεύθυνσή τους χωρίς όμως να τα μετατοπίζουν. Τελικά η επεξεργασία ενσωματώνεται στην P_2 με την ανακατασκευή της (πόζα \bar{P}_2) που προκύπτει από την εφαρμογή των Q_{2i} στα τρίγωνα της μετασχηματισμένης πόζας αναφοράς R .



Σχήμα 4.1 Ανακατασκευή μιας Πόζας της Ακολουθίας.

4.1. Κωδικοποίηση Επεξεργασίας

Ένας τρόπος να ανακατασκευάσουμε τις πόζες του μοντέλου είναι η αντιμετώπιση του ως ένα πλήθος από σημεία χωρίς να λάβουμε υπόψη τη συνδεσιμότητα τους. Αν για κάθε σημείο, οι συντεταγμένες του οποίου έχουν μεταβληθεί, αποθηκεύσουμε ένα διάνυσμα μετατόπισης, θα μπορούσαμε για κάθε πόζα να προσθέσουμε το διάνυσμα αυτό στις συντεταγμένες των κορυφών. Όπως όμως περιγράψαμε στην Ενότητα 2.1.1 αυτό θα οδηγούσε σε λανθασμένα αποτελέσματα αφού με αυτόν τον τρόπο αγνοούμε περιστροφές και αλλαγή των σχετικών θέσεων. Ακόμη βέβαια και αν θεωρήσουμε την υποθετική περίπτωση στην οποία ένα διάνυσμα μετατόπισης αρκεί για την κωδικοποίηση της επεξεργασίας, η εφαρμογή του δεν εγγυάται αποδεκτά αποτελέσματα. Αν για παράδειγμα σε κάποιο στιγμιότυπο η κλίμακα του αντικειμένου άλλαζε, τα διανύσματα μετατόπισης δεν θα ακολουθούσαν το μέγεθος του μοντέλου. Η προσαρμογή τους όμως στο νέο μέγεθος θα αποτύγχανε στην περίπτωση που η κλιμάκωση δεν ήταν ομοιόμορφη.

Για αυτό το λόγο, για να αναπαραστήσουμε την παραμόρφωση από την επεξεργασμένη πόζα ορίζουμε ένα deformation gradient E_i για κάθε τρίγωνο i του οποίου έστω μια κορυφή έχει μετασχηματιστεί, ως:

$$J_i^E = \bar{V}_i V_i^{-1}. \quad \text{Εξ. 4.1}$$

Ο Ιακωβιανός πίνακας J_i^E για το τρίγωνο i κατασκευάζεται από τις συντεταγμένες των κορυφών της επιλεγμένης πόζας πριν και μετά την επεξεργασία.

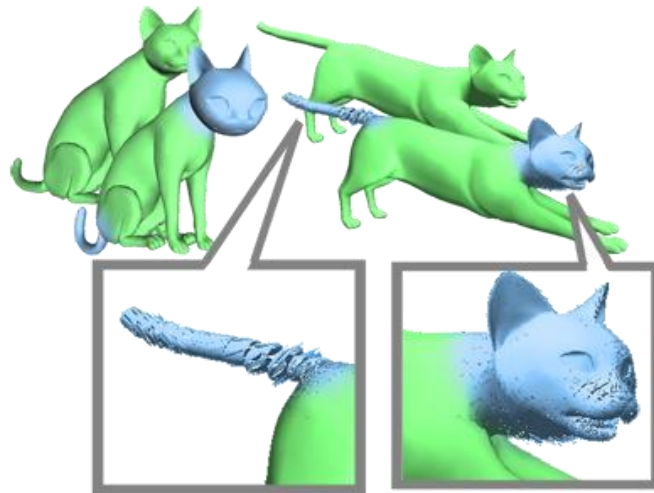
4.2. Ενσωμάτωση Επεξεργασίας

Η αναπαράσταση της επεξεργασίας ως το σύνολο των deformation gradients, αναπαριστά την περιστροφή, την αλλαγή του σχήματος και της διεύθυνση των μετασχηματισμένων τριγώνων. Για την μεταβολή της ακολουθίας σύμφωνα με την P_X^E , ανάλογοι μετασχηματισμοί πρέπει να γίνουν στις συντεταγμένες των αντίστοιχων τριγώνων για κάθε στιγμιότυπο. Η μέθοδος φτάνει στη λύση από την επαναληπτική εφαρμογή ενός τροποποιημένου αλγόριθμου μεταφοράς

παραμόρφωσης, όπου τα deformation gradients αντί να εφαρμόζονται σε κάθε πόζα χρησιμοποιούνται μόνο για το μετασχηματισμό της πόζας αναφοράς, από την οποία προκύπτει η παραμόρφωση για όλη την ακολουθία.

Η εφαρμογή ενός deformation gradient σε ένα τρίγωνο, έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της κατεύθυνσης και του σχήματος του χωρίς όμως να το μετατοπίζει στην πραγματική του θέση. Αυτό συμβαίνει επειδή για τον υπολογισμό του Ιακοβιανού πίνακα το διάνυσμα μετατόπισης αγνοείται. Αν θεωρήσουμε όμως την πόζα μιας ακολουθίας και την πόζα αναφοράς από την οποία έχει προέλθει, τα διανύσματα μετατόπισης για κάθε τρίγωνο είναι γνωστά και υπολογίζονται από τις συντεταγμένες των κέντρων βάρους τους. Από αυτήν την παρατήρηση η πρώτη σκέψη είναι πως για την ενσωμάτωση της επεξεργασίας μπορούμε αρχικά να εφαρμόσουμε τους πίνακες στα τρίγωνα της πόζας αναφοράς και έπειτα να προσθέσουμε σε κάθε ένα το αντίστοιχο διάνυσμα μετατόπισης. Όπως φαίνεται όμως στο Σχήμα 3.2 οι η επιφάνεια του μοντέλου δεν διατηρεί τη συνέχειά της, αφού τα διανύσματα μετατόπισης από την επεξεργασμένη εκδοχή της επιλεγμένης πόζας ακόμη και αν ληφθούν υπόψη δεν μετασχηματίζουν κατάλληλα την επιφάνεια.

Για αυτό το λόγο στηριζόμαστε στο συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε για τη Μεταφορά Παραμόρφωσης: αντί να εφαρμόζουμε τους ακριβείς μετασχηματισμούς βρίσκουμε την κατάλληλη προσέγγισή τους. Αντίθετα με το σκεπτικό να εφαρμόσουμε την επεξεργασία σε κάθε πόζα της ακολουθίας, αυτό που κάνουμε είναι να ενσωματώσουμε την παραμόρφωση που αυτή ορίζει μόνο στην πόζα αναφοράς. Παρόμοια με το αποτέλεσμα του Σχήματος 4.2 τα τρίγωνά της αλλάζουν κατεύθυνση και σχήμα, παραβιάζοντας όμως τη συνέχεια της επιφάνειας. Τελικά για την ανακατασκευή μιας πόζας P_x , ακολουθούμε τον αλγόριθμο της Μεταφοράς Παραμόρφωσης θεωρώντας ως τελικό μοντέλο την μετασχηματισμένη πόζα αναφοράς και ως αρχικό μετασχηματισμό τα deformation gradients S_{xi} . Ως γνωστόν, η μέθοδος αντί να εφαρμόσει τα S_{xi} κατασκευάζει το σύνολο $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ για κάθε ένα από τα m τα τρίγωνα του μοντέλου, ως την προσέγγισή τους. Με αυτόν τον τρόπο η συνέχεια της επιφάνειας της ανακατασκευασμένης πόζας είναι πλέον δεδομένη.



Σχήμα 4.2 Απευθείας Εφαρμογή των Deformation Gradients.

4.3. Ανάλυση

Η προσαρμογή της επιφάνειας για κάθε στιγμιότυπο της ακολουθίας, ώστε να περιλαμβάνει τις αλλαγές, επιτυγχάνεται με την επαναληπτική εφαρμογή της Επεξεργασίας Ακολουθίας. Η μέθοδος που ακολουθούμε, όπως αναφέραμε στηρίζεται στην ιδέα της μεταφοράς των παραμορφώσεων και οι παραγωγή των τελικών αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται με την επίλυση ενός προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων προσαρμοσμένο στις απαιτήσεις του προβλήματος.

Όπως περιγράψαμε στην Ενότητα 4.1, για να κωδικοποιήσουμε τη μεταβολή ενός τριγώνου που προέρχεται από την επεξεργασία, χρησιμοποιούμε ένα deformation gradient E_i . Ο αριθμός των τριγώνων που μπορεί να έχουν δεχθεί μεταβολή είναι αυθαίρετος και δεν επηρεάζει τη μέθοδο, όμως από εδώ και στο εξής θα θεωρούμε πως είναι ίσος με το πλήθος των τριγώνων του μοντέλου για ευκολία στην περιγραφή. Οι πίνακες J_i^E για κάθε E_i κατασκευάζονται από τις συντεταγμένες των κορυφών της επιλεγμένης πόζας στις δύο καταστάσεις της και έτσι είναι γνωστός. Εφαρμόζοντας τον πίνακα J_i^E στις κορυφές v_1, v_2, v_3 και v_4 κάθε τριγώνου i της πόζας αναφοράς, οι νέες θέσεις των κορυφών του υπολογίζονται ως:

$$\mathbf{J}^E v_k = v'_k, \quad \forall k \in 1 \dots 4. \quad \text{Εξ. 4.2}$$

Τα μετασχηματισμένα τρίγωνα, αν και δεν έχουν μετατοπιστεί στις πραγματικές τους θέσεις, έχουν αλλάξει σχήμα και κατεύθυνση όπως ορίζουν τα E_i . Σύμφωνα με τη νέα πόζα αναφοράς R που δημιουργείται από τα τρίγωνα αυτά, θα ανακατασκευάσουμε κάθε πόζα τις ακολουθίας εκμεταλλευόμενοι τη γραμμικότητα των deformation gradients.

Πλέον ως πόζα αναφοράς για το πρόβλημα θεωρούμε την πόζα R . Για να τη μετασχηματίσουμε με τέτοιο τρόπο ώστε να παραχθούν οι νέες πόζες που θα συμπεριλαμβάνουν την επεξεργασία, εφαρμόζουμε σε αυτήν τα deformation gradients S_i για κάθε πόζα της αρχικής ακολουθίας. Στην πραγματικότητα όμως, στόχος είναι να βρούμε το κατάλληλο σύνολο $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ ώστε για κάθε τρίγωνο το T_i να ταιριάζει όσο το δυνατόν περισσότερο στο S_i . Αναλύοντας καταρχάς τα T_i , τα στοιχεία τους κατασκευάζονται ως γραμμικός συνδυασμός των συντεταγμένων των κορυφών της R και των άγνωστων συντεταγμένων της επιθυμητής πόζας την οποία πρόκειται να κατασκευάσουμε. Θεωρώντας ένα τρίγωνο i με κορυφές v_1, v_2, v_3 και την επιπλέον κορυφή v_4 στην R και τις μετασχηματισμένες κορυφές του τριγώνου $\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \tilde{v}_3$ και \tilde{v}_4 στην επιθυμητή πόζα, ο πίνακας του deformation gradient υπολογίζεται ως το γινόμενο των πινάκων V^{-1} και \bar{V} με:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} (v'_2 - v'_1)_x & (v'_3 - v'_1)_x & (v'_4 - v'_1)_x \\ (v'_2 - v'_1)_y & (v'_3 - v'_1)_y & (v'_4 - v'_1)_y \\ (v'_2 - v'_1)_z & (v'_3 - v'_1)_z & (v'_4 - v'_1)_z \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} (\tilde{v}_2 - \tilde{v}_1)_x & (\tilde{v}_3 - \tilde{v}_1)_x & (\tilde{v}_4 - \tilde{v}_1)_x \\ (\tilde{v}_2 - \tilde{v}_1)_y & (\tilde{v}_3 - \tilde{v}_1)_y & (\tilde{v}_4 - \tilde{v}_1)_y \\ (\tilde{v}_2 - \tilde{v}_1)_z & (\tilde{v}_3 - \tilde{v}_1)_z & (\tilde{v}_4 - \tilde{v}_1)_z \end{bmatrix}. \quad \text{Εξ. 4.3}$$

Τα στοιχεία του πίνακα V είναι σταθερές αφού υπολογίζονται από τις συντεταγμένες των ακμών του τριγώνου στην R που είναι γνωστές. Αν ονομάσουμε ως bst κάθε στοιχείο $V_{st} \quad \forall s, t \in 1 \dots 3$ το deformation gradient T_i εκφράζεται ως γραμμικός συνδυασμός των άγνωστων κορυφών σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\begin{aligned}
T_{1r} &= -(b_{1r} + b_{2r} + b_{3r}) \tilde{v}_{1x}^i + b_{1r} \tilde{v}_{2x}^i + b_{2r} \tilde{v}_{3x}^i + b_{3r} \tilde{v}_{4x}^i \\
T_{2r} &= -(b_{1r} + b_{2r} + b_{3r}) \tilde{v}_{1y}^i + b_{1r} \tilde{v}_{2y}^i + b_{2r} \tilde{v}_{3y}^i + b_{3r} \tilde{v}_{4y}^i \quad \text{με } r \in 1 \dots 3. \quad \text{Εξ. 4.4} \\
T_{3r} &= -(b_{1r} + b_{2r} + b_{3r}) \tilde{v}_{1z}^i + b_{1r} \tilde{v}_{2z}^i + b_{2r} \tilde{v}_{3z}^i + b_{3r} \tilde{v}_{4z}^i
\end{aligned}$$

Έτσι παρόμοια με την περιγραφή της ενότητας 2.4.1 το σύνολο των deformation gradients T μπορεί να εκφραστεί ως το σύστημα γραμμικών εξισώσεων:

$$BX = Q \quad \text{Εξ. 4.5}$$

το οποίο μπορεί να διαχωριστεί σε τρία υποσυστήματα $B_j X_j = Q_j$, $\forall j \in 1 \dots 3$, καθένα από τα οποία λύνεται ξεχωριστά και είναι υπεύθυνο για μια από τις τρεις συνιστώσες των συντεταγμένων. Ο πίνακας X αποτελείται από τους πίνακες X_1 , X_2 και X_3 στη σειρά, όπου στον πρώτο περιέχονται οι x συντεταγμένες των άγνωστων κορυφών και στους άλλους δύο οι συντεταγμένες y και z αντίστοιχα. Στους πίνακες Q_j οι οποίοι κατασκευάζουν τον πίνακα Q , περιέχονται οι άγνωστες εγγραφές των deformation gradients T_i τοποθετημένες σύμφωνα με τον πίνακες X_j . Η συσχέτιση μεταξύ των δύο πινάκων προέρχεται από τον πίνακα B ο οποίος κατασκευάζεται από τις συντεταγμένες τις νέας πόζας αναφοράς R και έχει τη μορφή:

$$B = \begin{bmatrix} B' & & \\ & B' & \\ & & B' \end{bmatrix} \quad \text{με } B' = \begin{bmatrix} \vdots & & & \\ b_1^i & b_{11}^i & b_{12}^i & b_{13}^i \\ \dots b_2^i \dots b_{21}^i \dots b_{22}^i \dots b_{23}^i \dots \\ b_3^i & b_{31}^i & b_{32}^i & b_{33}^i \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \quad \text{Εξ. 4.6}$$

με $b_r^i = -(b_{r1}^i + b_{r2}^i + b_{r3}^i)$ για $r=1,2,3$. Αν στον πίνακα Q αποθηκεύσουμε τις τιμές των στοιχείων των S_i , οι οποίες είναι γνωστές και ακολουθήσουμε τη διαδικασία της Ενότητας 2.4.2, η κατασκευή των T_i , που συνεπάγεται την εύρεση των άγνωστων κορυφών περιγράφεται από ένα πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων που ελαχιστοποιεί το άθροισμα της διαφοράς για κάθε T_i και S_i .

Επειδή για την παραγωγή μιας μοναδικής λύσης περιορίζουμε κάποιες κορυφές σε σταθερά σημεία, οι άγνωστοι πλέον είναι μόνο οι ελεύθερες κορυφές. Για αυτό το λόγο διαγράφουμε από τον πίνακα X τις αντίστοιχες γραμμές και από τον B τις αντίστοιχες στήλες και προσαρμόζουμε κατάλληλα τον Q . Έτσι για την εύρεση κάθε συνιστώσας των κορυφών θεωρούμε τα τρία υποπροβλήματα ελαχίστων τετραγώνων:

$$\min_u \left\| \hat{B} \hat{X}_j - \hat{Q}_j \right\|_2^2, \quad j \in 1 \dots 3 \quad \text{Εξ. 4.7}$$

αντίστοιχα της Εξίσωσης (2.21), όπου ως u δηλώνουμε το πλήθος των ελεύθερων άγνωστων κορυφών. Για να φτάσουμε στην επίλυση, θεωρούμε τις κανονικές εξισώσεις $\hat{B}^T \hat{B} \hat{X}_j = \hat{B}^T \hat{Q}_j$ από τις οποίες προκύπτουν και οι τρεις συνιστώσες των συντεταγμένων των κορυφών. Τελικά από τους πίνακες X_1 , X_2 και X_3 και τις κορυφές που έχουν περιοριστεί στα σταθερά σημεία, κατασκευάζουμε την επιφάνεια της επιθυμητής πόζας.

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση της παραμόρφωσης από μια επεξεργασμένη πόζα σε όλη την ακολουθία, επιτυγχάνεται από την επίλυση μιας σειράς από προβλήματα ελαχίστων τετραγώνων. Κάθε ένα από αυτά απαιτεί την επιμέρους λύση τριών υποπροβλημάτων για κάθε συνιστώσα των συντεταγμένων των κορυφών. Με αυτόν τον τρόπο η κατασκευή μιας πόζας γίνεται με πλήρως αποδοτικό τρόπο. Μάλιστα, επειδή ο πίνακας $\hat{B}^T \hat{B}$ είναι ίδιος για κάθε υποπρόβλημα, αφού κατασκευάζεται από την μετασχηματισμένη πόζα αναφοράς, ο υπολογισμός του γίνεται μια φορά αρχικά συνεισφέροντας κι άλλο στο χρόνο εκτέλεσης

4.4. Αποτελέσματα

Για να ελέγξουμε την αποδοτικότητα της Επεξεργασίας Ακολουθίας, εφαρμόσαμε τη μέθοδο σε ένα πλήθος παραδειγμάτων τα οποία και παραθέτουμε. Επειδή η έννοια της επεξεργασίας είναι γενική, δεν πρέπει να κάνει διαχωρισμό για το είδος των μοντέλων και των παραμορφώσεών τους. Για αυτό το λόγο δεν θα εξετάσουμε τα παραδείγματα για κάθε κατηγορία ξεχωριστά, γιατί άλλωστε αυτό που μας ενδιαφέρει

είναι να αξιολογήσουμε αν αποδίδεται επιτυχώς η επεξεργασία σε κάθε πόζα. Από τα παραδείγματα θα δούμε πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο είτε απλά για την αλλαγή των χαρακτηριστικών της επιφάνειας της ακολουθίας ή ακόμη και την τροποποίηση της σε τέτοιο βαθμό που η ανακατασκευασμένη ακολουθία να δίνει την εντύπωση ότι πρόκειται για δύο διαφορετικά μοντέλα.

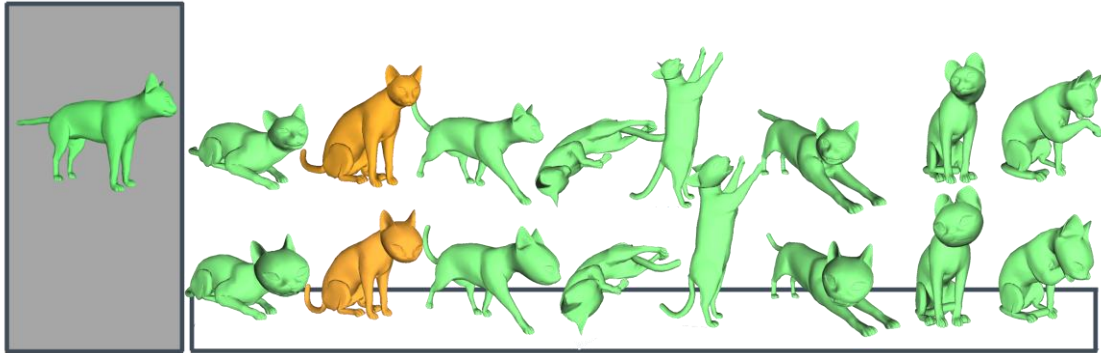
Τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος στα οποία εκτελέστηκαν τα πειράματα αναφέρθηκαν στην αντίστοιχη ενότητα του Κεφαλαίου 2 και η κατασκευή κάθε πόζας προήλθε από την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος στην κάρτα γραφικών. Ακολουθούμε επίσης το γνωστό πρότυπο απόδοσης για τα σχήματα, όπου η πρώτη σειρά από πόζες είναι η αρχική ακολουθία και η δεύτερη η ανακατασκευασμένη, με την πόζα αναφοράς να φαίνεται στα αριστερά. Σε κάθε σχήμα, με πορτοκαλί χρώμα δηλώνουμε την επιλεγμένη πόζα και την επεξεργασμένη εκδοχή της.

4.4.1. Τροποποίηση των Χαρακτηριστικών

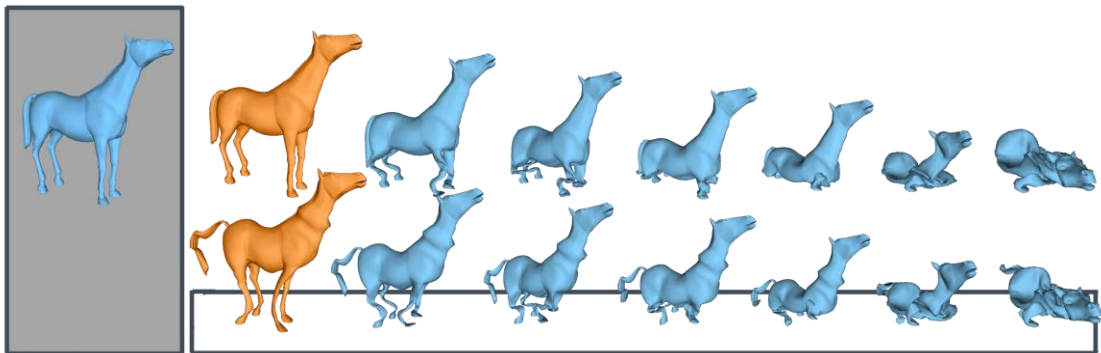
Μία εφαρμογή που μπορεί να βρει η μέθοδος είναι για την επεξεργασία των χαρακτηριστικών του μοντέλου. Η ακολουθία από πόζες μπορεί να έχει κατασκευαστεί με οποιοδήποτε τρόπο και για συγκεκριμένο σκοπό. Όμως η χρησιμοποίησή της σε μια διαφορετική περίπτωση ίσως απαιτεί προσαρμογή ώστε να καλύπτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως περισσότερη λεπτομέρεια της επιφάνειας ή τροποποίηση κάποιου προεξέχοντος χαρακτηριστικού.

Στα τέσσερα πρώτα σχήματα βλέπουμε πώς η Επεξεργασία Ακολουθίας μπορεί να τροποποιήσει την επιφάνεια και τα προεξέχοντα χαρακτηριστικά ολόκληρης της ακολουθίας από μια επεξεργασμένη πόζα της. Στην επιλεγμένη πόζα του Σχήματος 4.3, το κεφάλι της Γάτας έχει μεταβληθεί ώστε να μοιάζει σαν να έχει φουσκώσει και η ουρά της έχει λυγίσει προς τα πάνω. Όπως παρατηρούμε, η επιφάνεια κάθε πόζας που αναπαράγεται μεταβάλλεται κατάλληλα ώστε τα χαρακτηριστικά της να ακολουθούν το σχήμα που ορίζεται από την επιλεγμένη πόζα και την επεξεργασμένη εκδοχή της. Στο Σχήμα 4.4 επίσης, έχουμε λυγίσει τα πόδια του Αλόγου προς το εσωτερικό, έχουμε αλλάξει το σχήμα της ουράς και στο λαιμό του δημιουργήσαμε έναν δακτύλιο. Επειδή τα χαρακτηριστικά αυτά δέχονται μεγάλη παραμόρφωση στο

animation, η ενσωμάτωση της μεταβολής στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι μια καλή δοκιμασία για την αποδοτικότητα της μεθόδου. Από τα αποτελέσματα όμως φαίνεται πως η μέθοδος ανακατασκευάζει τις πόζες κατάλληλα, χωρίς η αλλαγή των χαρακτηριστικών να δημιουργεί κάτι το ανεπιθύμητο.

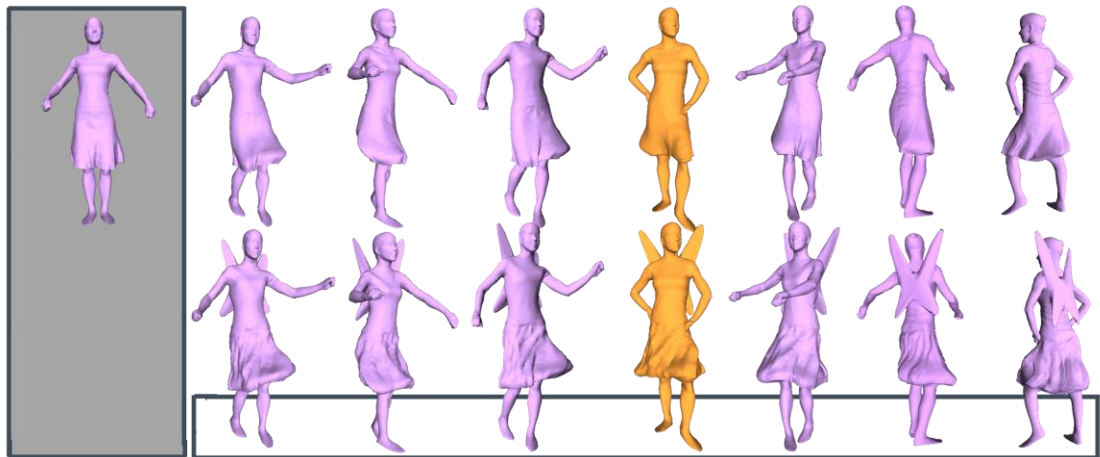


Σχήμα 4.3 Ανακατασκευή των Ποζών της Γάτας.

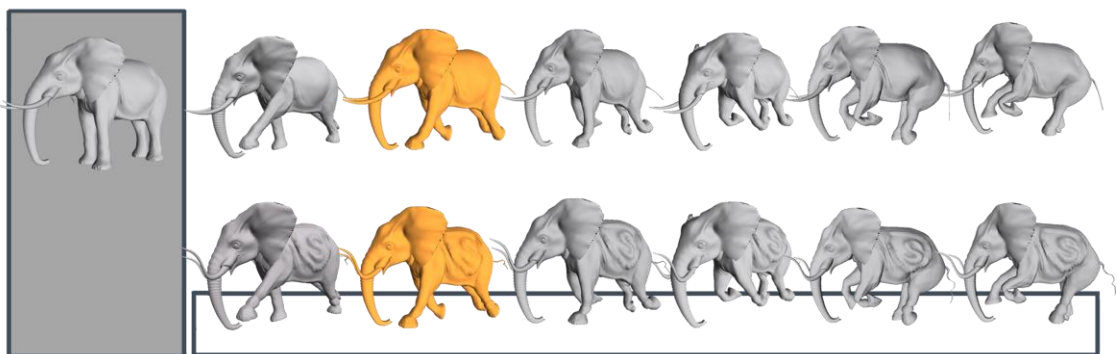


Σχήμα 4.4 Ανακατασκευή της Κατάρρευσης του Αλόγου.

Παρομοίως, στα σχήματα 4.5 και 4.6 τροποποιήσαμε ορισμένα χαρακτηριστικά των μοντέλων. Συγκεκριμένα, στον Ελέφαντα τους χαυλιόδοντες, την ουρά και τα αριστερά του πόδια και στη Χορεύτρια προσθέσαμε φτερά στον κορμό της σαν να πρόκειται για νεράιδα. Στα αποτελέσματα φαίνεται πως η μεταβολή από την επεξεργασία αναπαράγεται χωρίς πρόβλημα, όπως και στα δύο προηγούμενα παραδείγματα. Όμως όσον αφορά τα συγκεκριμένα μοντέλα, αξίζει να σταθούμε στην επεξεργασία της επιφάνειάς τους για τη δημιουργία λεπτομέρειας και στην ενσωμάτωσή της σε όλες τις πόζες της ακολουθίας.



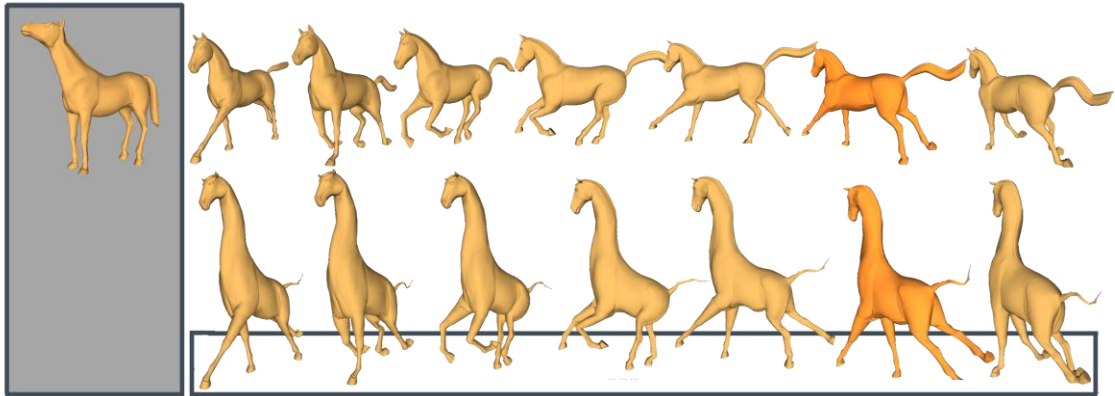
Σχήμα 4.5 Ανακατασκευή της Κίνησης της Χορεύτριας.



Σχήμα 4.6 Επεξεργασία της Επιφάνειας και των Χαρακτηριστικών του Ελέφанта.

Στο Σχήμα 4.5, η φούστα της Χορεύτριας στην αρχική ακολουθία είναι λεία και έχει λίγες πτυχές. Επιλέξαμε όμως να αλλάξουμε την υφή του υφάσματος της επιλεγμένης πόζας, ώστε να δίνει την αίσθηση πως είναι τσαλακωμένο και επιπλέον προσθέσαμε έντονες πτυχές. Επειδή όμως το αρχικό animation αναπαριστά μια συνεχόμενη κίνηση στην οποία η φούστα μεταβάλλεται σύμφωνα με τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτήν από το σώμα της Χορεύτριας (το animation έχει κατασκευαστεί με motion capture), η ρεαλιστική απόδοση της επεξεργασίας στην ανακατασκευασμένη κίνηση είναι πρόκληση. Η μέθοδος όμως φαίνεται να ανταπεξέρχεται στη δυσκολία της προσαρμογή των πτυχών, με τη φούστα στο τελικό animation να φαίνεται φυσική. Επιτυχώς φαίνεται να ανταποκρίνεται η μέθοδος και στο παράδειγμα του Ελέφанта, στον κορμό του οποίου έχουμε δημιουργήσει το γνωστό σήμα του Superman. Ο κορμός παραμορφώνεται ανάλογα με την κίνηση των ποδιών και ιδικά το σχήμα των

περιοχών που βρίσκονται κοντά στις αρθρώσεις αλλάζει ώστε να αναπαρασταθεί η ελαστικότητα του δέρματος. Στο ανακατασκευασμένο animation, η στρέβλωση του σήματος φαίνεται πως ακολουθεί την κίνηση του υπόλοιπου σώματος και ο όγκος του ακολουθεί την καμπυλότητα κάθε περιοχής.

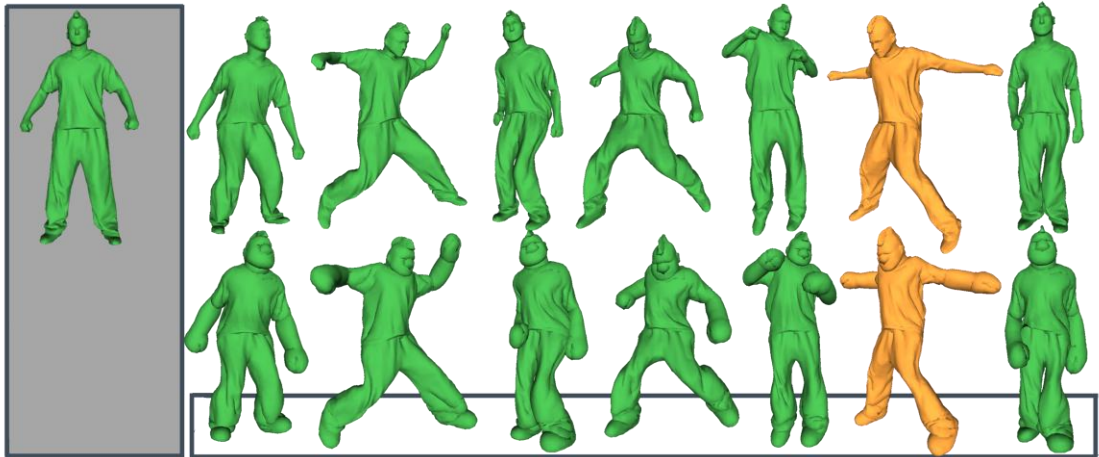


Σχήμα 4.7 Μετατροπή του Αλόγου σε Καμηλοπάρδαλη.

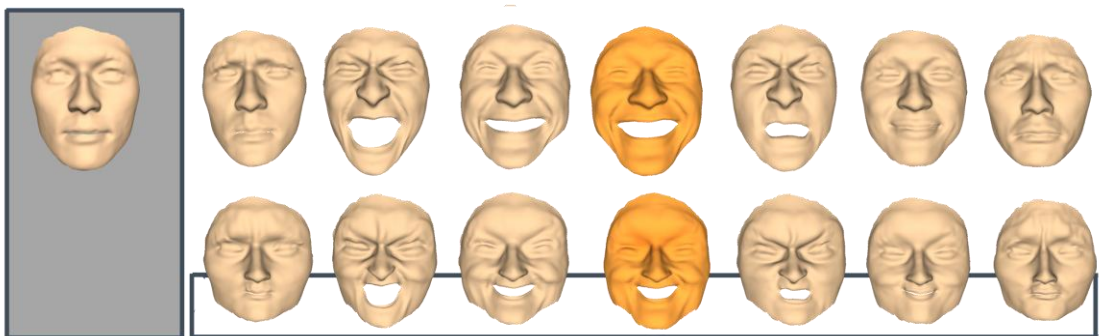
4.4.2. Παραγωγή Διαφοροποιημένης Ακολουθίας

Η αξιοποίηση της Επεξεργασίας Ακολουθίας δεν περιορίζεται μόνο στην επεξεργασία ενός animation για την τροποποίηση των χαρακτηριστικών και της επιφάνειάς του, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση κατασκευή μιας νέας ακολουθίας. Το ποσοστό της μεταβολής που δέχεται το μοντέλο λόγω της επεξεργασίας, καθορίζει κατά πόσο το τελικό αποτέλεσμα θα αποκλίνει οπτικά από την αρχική ακολουθία. Όταν για παράδειγμα ο στόχος είναι η διόρθωση κάποιου λάθους ή η λεπτομερέστερη απόδοση, η αρχική ακολουθία αναπαράγεται χωρίς μεγάλες αλλαγές στο σχήμα του μοντέλου. Αντίθετα, όταν η επιλεγμένη πόζα μεταβληθεί σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα διαφοροποιείται από το αρχικό και πιθανώς να δίνει την εντύπωση πως έχει προέρθει από ένα δεύτερο μοντέλο.

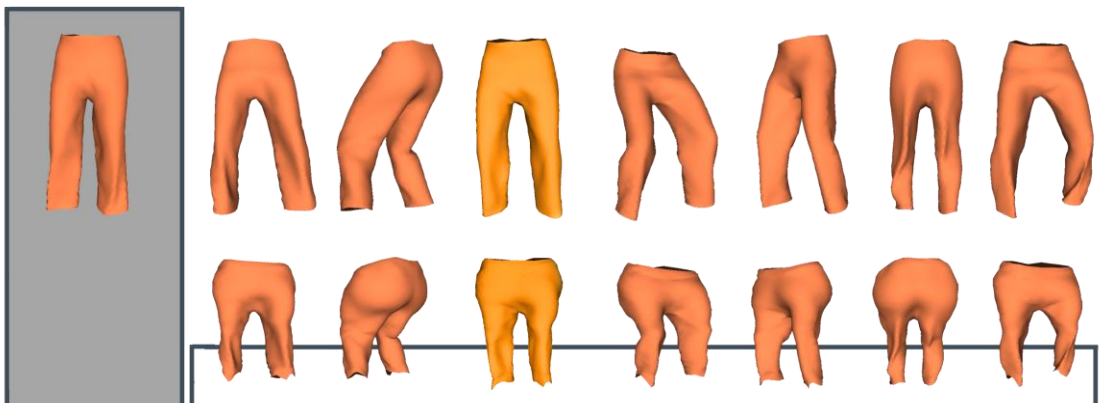
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι το αποτέλεσμα του Σχήματος 4.7. Τα χαρακτηριστικά της επιλεγμένης πόζας έχουν μεταβληθεί ώστε το μοντέλο του Αλόγου να θυμίζει καμηλοπάρδαλη. Σχεδόν όλα τα τμήματά του έχουν δεχθεί μεγάλες μεταβολές με τις δύο πόζες τελικά να διαφέρουν αρκετά



Σχήμα 4.8 Μετατροπή του Bouncing σε Χαρακτήρα Cartoon.



Σχήμα 4.9 Ανακατασκευή των Εκφράσεων του Προσώπου .

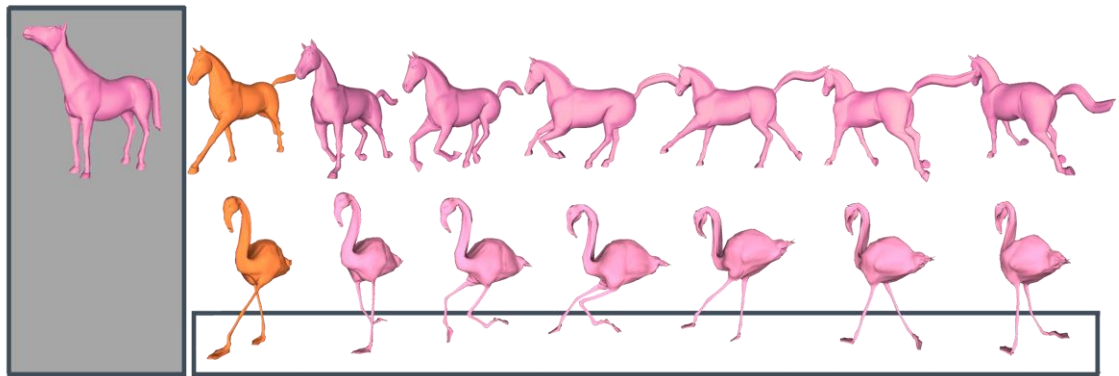


Σχήμα 4.10 Προσαρμογή του Παντελονιού σε Διαφορετικό Σωματότυπο Ανθρώπου.

Βέβαια, παρόλο που οπτικά φαίνεται πως θα μπορούσαν να είναι δύο διαφορετικά μοντέλα, ουσιαστικά το μόνο που αλλάζει είναι οι συντεταγμένες των κορυφών αφού ο αριθμός τους και η συνδεσιμότητά τους διατηρείται. Παρόλο όμως που το μοντέλο δεν αλλάζει, η έξοδος του αλγορίθμου είναι το animation ενός μοντέλου που θυμίζει καμηλοπάρδαλη που αντιγράφει τον καλπασμό του Αλόγου. Ανάλογα είναι και τα τρία επόμενα σχήματα, στα οποία η τελική ακολουθία μοιάζει να προέρχεται από κάποιο μοντέλο παρόμοιο με το αρχικό. Στο πρώτο από αυτά (Σχήμα 4.8) έχουμε επεξεργαστεί το μοντέλο του Bouncing ώστε να μοιάζει σαν να έχει μεταμορφωθεί σε χαρακτήρα cartoon με μεγάλα χέρια και πόδια. Στο Σχήμα 4.9 το τελικό animation φαίνεται να προέρχεται από ένα πρόσωπο με πιο λεπτά χαρακτηριστικά και πιο στρογγυλεμένο σχήμα από ότι το αρχικό και στο Σχήμα 4.10 έχουμε αλλάξει το Παντελόνι σαν να πρόκειται να συνδυαστεί με έναν χαρακτήρα με μεγάλη κοιλιά και κοντά πόδια.

Στα παραπάνω παραδείγματα η επιλεγμένη πόζα κάθε μοντέλου έχει μεταβληθεί ώστε να φαίνεται σαν να πρόκειται για κάποιο διαφορετικό αντικείμενο. Παρόλα αυτά η γενική μορφή των αντικειμένων διατηρείται στην ανακατασκευασμένη ακολουθία. Για να ελέγξουμε την αποτελεσματικότητα της μεθόδου και να προβάλλουμε τη χρησιμότητά της κατασκευάσαμε τρία παραδείγματα τα οποία και παραθέτουμε παρακάτω. Σε καθένα από αυτά η επιλεγμένη πόζα μεταβάλλεται έτσι ώστε η σημασιολογία της να διαφέρει εντελώς από την αρχική κατάστασή της. Στο Σχήμα 4.11 τροποποιήσαμε την επιφάνεια του Αλόγου ώστε τελικά να μοιάζει με flamingo. Το Flamingo που κατασκευάσαμε διαφέρει πλήρως από το πρωτότυπο μοντέλο του Αλόγου με τη σημαντικότερη διαφορά να σημειώνεται στο πίσω μέρος του μοντέλου. Ένα flamingo έχει δύο πόδια, ενώ ένα άλογο είναι τετράποδο και έχει ουρά. Έτσι συρρικνώσαμε τα πόδια και την ουρά του Αλόγου κατασκευάζοντας την ουρά του Flamingo. Βέβαια, τα γόνατα ενός flamingo δεν λυγίζουν κατά αυτόν τον τρόπο αλλά αυτό δεν είναι κάτι που μας απασχολεί στη συγκεκριμένη περίπτωση.

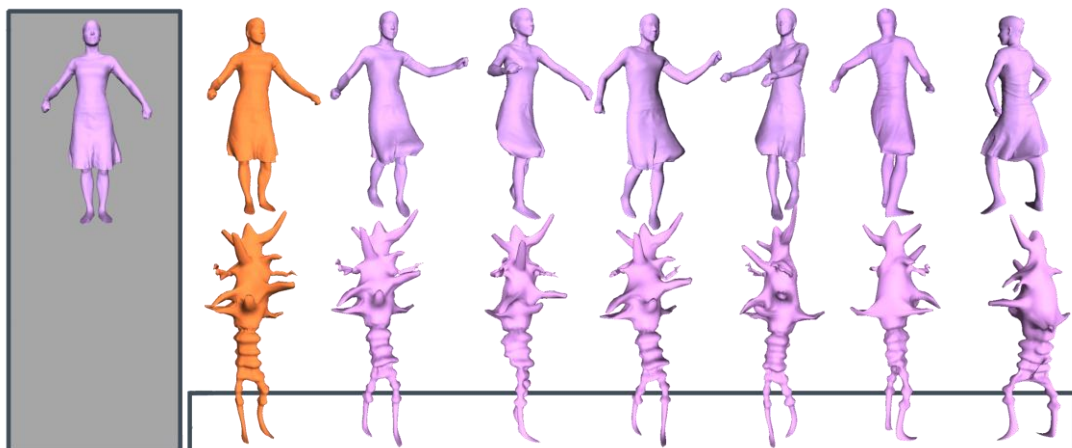
Παρόμοιας φιλοσοφίας είναι και η επεξεργασία του Σχήματος 4.12. Το μοντέλο του Bouncing έχει τροποποιηθεί σε τέτοιο βαθμό που δεν θυμίζει καθόλου το μοντέλο από το οποίο έχει προέλθει. Η επιλεγμένη πόζα έχει μεταβληθεί σε ένα χριστουγεννιάτικο δέντρο, αλλάζοντας κάθε τμήμα της επιφάνειας του Bouncing.



Σχήμα 4.11 Μετατροπή του Αλόγου σε Flamingo.



Σχήμα 4.12 Μετατροπή του Bouncing σε Χριστουγεννιάτικο Δέντρο.



Σχήμα 4.13 Μετατροπή της Χορεύτριας σε Ανθρωπόμορφο Κάκτο.

Τα πόδια έχουν συρρικνωθεί στο κάτω μέρος, το κεφάλι έχει μετατραπεί σε αστέρι και ολόκληρο το υπόλοιπο σώμα έχει αλλάξει ώστε να κατασκευαστούν τα κλαδιά. Αν και η μεταβολή της επιφάνειας είναι πολύ μεγάλη, η μέθοδος δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα στην ανακατασκευή των ποζών. Μάλιστα, οι ανακατασκευασμένες πόζες για το Δέντρο εξακολουθούν να αναπαριστούν την κίνηση του αρχικού μοντέλου. Στο Σχήμα 4.13 φαίνεται η ανακατασκευή της Χορεύτριας ώστε να μοιάζει με ανθρωπόμορφο κάκτο. Στην επεξεργασμένη εκδοχή της επιλεγμένης πόζας φαίνεται η επεξεργασία που πραγματοποιήσαμε στην επιφάνεια, όπου εκτός από την ύπαρξη κάτω άκρων ο Κάκτος δεν θυμίζει και πολύ ανθρώπινο σώμα. Όπως φαίνεται όμως η ανακατασκευή δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα και οι πόζες ενσωματώνουν άριστα την επεξεργασία.

Σε όλα τα παραπάνω παραδείγματα φαίνεται πως η μέθοδος της Επεξεργασίας Ακολουθίας μπορεί να ανακατασκευάσει πειστικά την ακολουθία από πόζες, ακόμα και όταν η μεταβολή που έχει δεχθεί η επιλεγμένη πόζα έχει αλλάξει σε μεγάλο βαθμό τη δομή της. Σε αυτήν την περίπτωση, η Επεξεργασία Ακολουθίας μπορεί να συγκριθεί με τη Μεταφορά Παραμόρφωσης αφού οι πόζες θα μπορούσαν να έχουν προέλθει από ένα μοντέλο όμοιο με αυτό που ορίζει η ανακατασκευασμένη ακολουθία.

4.4.3. Περιορισμοί

Για την ενσωμάτωση της επεξεργασίας, η μέθοδος της Επεξεργασίας Ακολουθίας βασίζεται στην επίλυση ενός γραμμικού συστήματος παρόμοια με τη Μεταφορά Παραμόρφωσης. Οι περιορισμοί που προκύπτουν από την ανακατασκευή των ποζών μπορούν να συγκριθούν με αυτούς που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 2, έχοντας όμως υπόψη την ειδοποιό διαφορά των δυο μεθόδων: στη Μεταφορά Παραμόρφωσης οι μετασχηματισμοί της επιφάνειας μεταφέρονται σε ένα δεύτερο μοντέλο ενώ στην Επεξεργασία Ακολουθίας το μοντέλο είναι το ίδιο. Στην πρώτη μέθοδο, οι περιορισμοί που εντοπίσαμε ήταν η ανάγκη για ομοιότητα των μοντέλων, η μεταφορά των χαρακτηριστικών του αρχικού στο τελικό και η πιθανότητα κατασκευής αυτοτεμνόμενων τμημάτων.

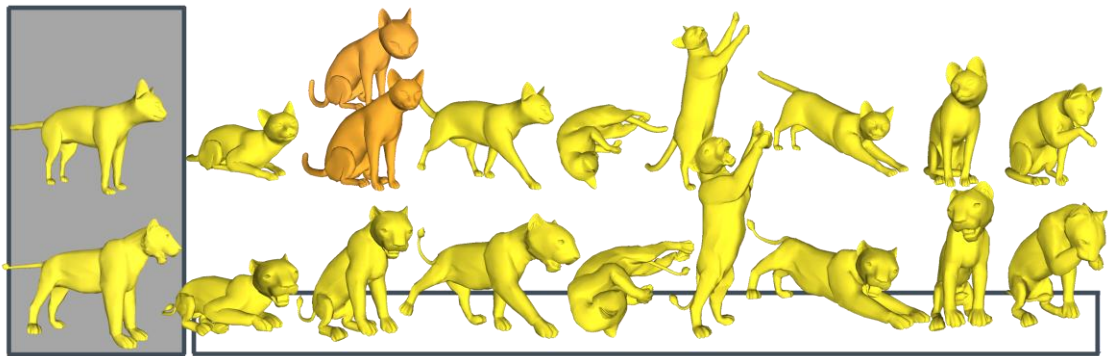
Όπως γίνεται αντιληπτό, επειδή η επεξεργασία εφαρμόζεται στις πόζες του ίδιου μοντέλου, οι περιορισμοί από τη μεταφορά των μετασχηματισμών δεν μπορούν να καλύψουν την περίπτωση της Επεξεργασίας Ακολουθίας. Εξετάζοντας όμως τα παραδείγματα φαίνεται πως οι περιορισμοί που δημιουργούνται από τη χρήση της μοιάζουν αρκετά με αυτούς που αναφέραμε προηγουμένως. Συγκεκριμένα όπως για την παραγωγή λογικών αποτελεσμάτων τα δύο μοντέλα πρέπει να είναι όμοια, έτσι και εδώ η επιλεγμένη πόζα και η επεξεργασμένη εκδοχή της θα πρέπει να είναι σημασιολογικά όμοιες ώστε να αποφευχθούν λανθασμένα αποτελέσματα. Η αρχική ακολουθία του Αλόγου του Σχήματος 4.3 πληροί όλες τις προϋποθέσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ακαλαίσθητα αποτελέσματα. Επειδή το animation αναπαριστά την κατάρρευση του μοντέλου, κάθε πόζα εμπεριέχει την έννοια του χρόνου και δείχνει την κατάσταση του μοντέλου σε μια υποθετική χρονική στιγμή. Αν αυτό το αγνοήσουμε και επεξεργαστούμε αυθαίρετα την επιλεγμένη πόζα το πιο πιθανό είναι πως η τελική ακολουθία δεν θα αναπαριστά μια κατάρρευση. Για παράδειγμα, αν μεταβάλλουμε την ουρά του Αλόγου ώστε η κατεύθυνσή της να είναι παράλληλη με το έδαφος, τότε στην πέμπτη πόζα ενώ ακόμη δεν θα έχει ακουμπήσει στο έδαφος, θα αρχίσει να διπλώνει επειδή αυτό ορίζει η αντίστοιχη αρχική.

Ένα ακόμη αρνητικό αποτέλεσμα που μπορεί να δημιουργηθεί από την αυθαίρετη επεξεργασία είναι η ανακατασκευή ποζών στις οποίες τμήματα τις επιφάνειες τέμνονται μεταξύ τους. Επειδή η αρχική ακολουθία είναι κατασκευασμένη σύμφωνα με τα δεδομένα χαρακτηριστικά του μοντέλου, η ενσωμάτωση της επεξεργασίας ίσως απαιτεί την τροποποίηση και άλλων τμημάτων του για να μην παραβιάζονται οι φυσικοί νόμοι. Η τελευταία ανακατασκευασμένη πόζα από την ακολουθία της Γάτας του Σχήματος 4.3 υπάγεται σε αυτήν την κατηγορία. Στην αρχική πόζα, το δεξί μπροστινό πόδι της σχεδόν ακουμπά με το κεφάλι της. Όταν όμως μέθοδος αναπαράγει την πόζα, το κεφάλι δεν προσαρμόζεται σύμφωνα με τη στάση του χεριού και για αυτό το λόγο τα δύο χαρακτηριστικά τέμνονται μεταξύ τους.

4.4.4. Μεταφορά Μετασχηματισμών με Επεξεργασία

Από τις μεθόδους της Μεταφοράς Παραμόρφωσης και της Επεξεργασίας Ακολουθίας είδαμε πως μπορούμε να μετασχηματίσουμε ένα μοντέλο ώστε να αντιγράψει την

παραμόρφωση ενός αρχικού και να ανακατασκευάσουμε την υφιστάμενη ακολουθία ενός μοντέλου από την επεξεργασία μιας πόζας του. Αν συνδυάσουμε τις δύο μεθόδους προκύπτει μια εφαρμογή κατά την οποία για ένα στατικό μοντέλο κατασκευάζεται μια ακολουθία από πόζες αντιγράφοντας την παραμόρφωση από ένα αρχικό ενώ ταυτόχρονα κάθε πόζα ενσωματώνει την επεξεργασία από μια επιλεγμένη πόζα του αρχικού. Στο Σχήμα 4.14 οι πόζες του Λιονταριού έχουν κατασκευαστεί με αυτόν τον τρόπο και όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, η συνολική παραμόρφωση για κάθε πόζα εμπεριέχει τις επιμέρους παραμορφώσεις.



Σχήμα 4.14 Μεταφορά Παραμόρφωσης με Επεξεργασία.

Βέβαια, αυτή η μέθοδος δεν εγγυάται πάντα την κατασκευή των αναμενόμενων αποτελεσμάτων. Επειδή τα αντικείμενα συνήθως έχουν διαφορά στην ανάλυση, η περιοχή που πρέπει να μετασχηματιστεί στο τελικό ώστε να αναπαραστήσει την επεξεργασία ίσως να μην έχει επαρκή αριθμό τριγώνων. Έτσι η επεξεργασία δεν θα μπορεί να προσαρμοστεί χωρίς την αλλαγή της ανάλυσης της επιφάνειας του τελικού. Επίσης, όταν η επεξεργασία ορίζεται από λεπτομερείς παραμορφώσεις στην επιλεγμένη επιφάνεια, ο αλγόριθμος αντιστοιχίας απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό από δείκτες επιβαρύνοντας έτσι την παρέμβαση του χρήστη.

4.4.5. Χρόνοι Εκτέλεσης

Για την ανακατασκευή κάθε πόζας της ακολουθίας ενός μοντέλου σύμφωνα με τη μέθοδο της Επεξεργασίας Ακολουθίας, απαιτείται αρχικά η τροποποίηση της πόζας αναφοράς και έπειτα η επίλυση ενός γραμμικού συστήματος για τις τιμές κάθε

συνιστώσας των συντεταγμένων της. Η επίλυση των συστημάτων για την εύρεση των συντεταγμένων πραγματοποιήθηκε στην κάρτα γραφικών. Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2, για την υλοποίηση χρησιμοποιήσαμε τη βιβλιοθήκη CUSP η οποία είναι γραμμένη σε CUDA. Στη συνέχεια παραθέτουμε τον μέσο χρόνο εκτέλεσης για κάθε συνιστώσα των συντεταγμένων. Από την ανάλυση του χρόνου για όλα τα μοντέλα του Πίνακα 4.1 θα καταλήξουμε στη συμπεριφορά του αλγορίθμου για την ενσωμάτωση της επεξεργασίας.

Πίνακας 4.1 Δεδομένα Μοντέλων

Μοντέλο	Κορυφές	Τρίγωνα
Γάτα	7207	14410
Αλογο	8431	16843
Χορεύτρια	9971	19938
Ελέφαντας	42321	84638
Bouncing	10002	20000
Πρόσωπο	29299	57836
Παντελόνι	1453	2859

Στον Πίνακα 4.2 περιλαμβάνονται οι χρόνοι για κάθε παράδειγμα. Η δεύτερη στήλη αναφέρεται στη διάσταση του συστήματος, δηλαδή το μέγεθος της λύσης και των εξισώσεων, η τρίτη στο μέσο χρόνο που χρειάστηκε για την επίλυση των συστημάτων για κάθε παράδειγμα και η τέταρτη στο χρόνο για να γίνει preconditioning στον πίνακα. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.2 και το διάγραμμα του Σχήματος 4.12, η συμπεριφορά της μεθόδου εξαρτάται από έναν συνδυασμό παραγόντων.

Καταρχάς φαίνεται πως τη μέθοδο επηρεάζει η διάσταση του συστήματος, που μεταφράζεται ως το μέγεθος του μοντέλου (ισούται με το άθροισμα των κορυφών και των τριγώνων του). Αυτό όμως δεν είναι απόλυτο γιατί η διάσταση και ο χρόνος δεν είναι ποσά ανάλογα. Αυτό αποτυπώνεται ξεκάθαρα στους χρόνους των παραδειγμάτων του Αλόγου, της Χορεύτριας και του Bouncing. Όσον αφορά το Αλογο, στο παράδειγμα της κατάρρευσης ο χρόνος επίλυσης είναι σχεδόν ο μισός από αυτόν του παραδείγματος που μετατρέπεται σε flamingo. Επίσης στο παράδειγμα που ο Bouncing μετατρέπεται στο Δέντρο και σε αυτό όπου η Χορεύτρια

μεταβάλλεται ώστε να μοιάζει με κάκτο, απαιτείται περισσότερος χρόνος από τα παραδείγματα στα οποία η επεξεργασία στα μοντέλα είναι σχετικά μικρή.

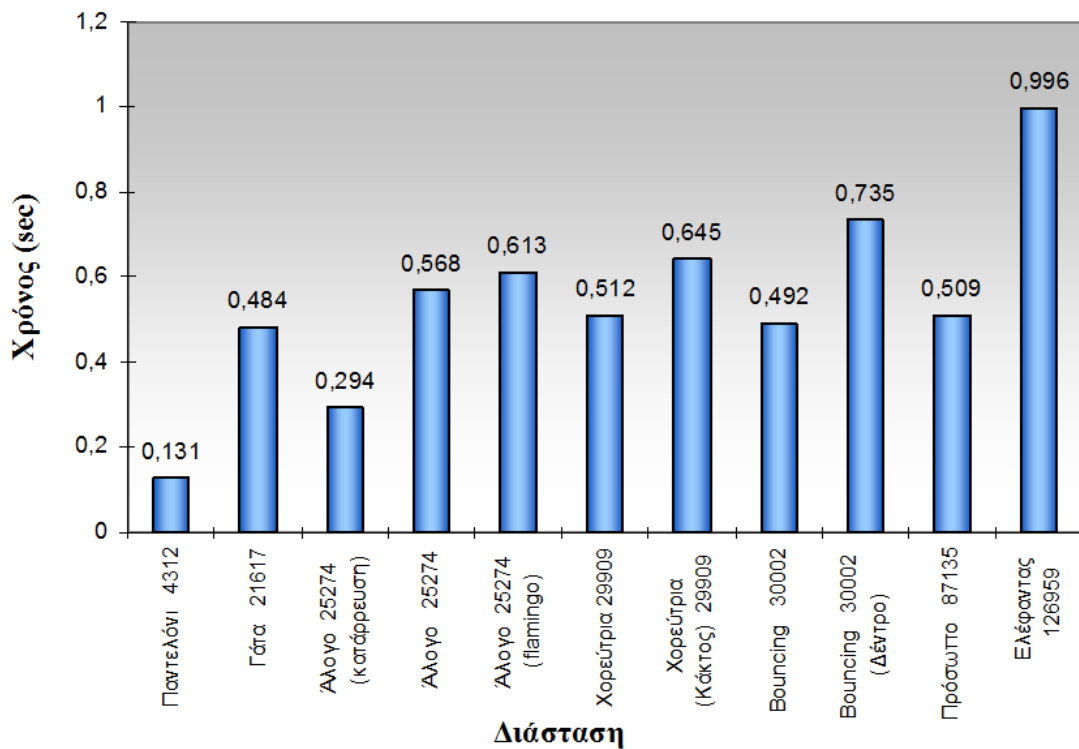
Πίνακας 4.2 Χρόνος Επίλυσης Συστήματος

Παράδειγμα	Διάσταση $n \times n$	Μ.Ο για κάθε συνιστώσα (sec)	Preconditioning (sec)
Γάτα	n = 21617	0.484	0.130
Άλογο	n = 25274	0.568	0.151
Χορεύτρια	n = 29909	0.512	0.193
Ελέφαντας	n = 126959	0.996	0.662
Άλογο (κατάρρευση)	n = 25274	0.294	0.144
Bouncing	n = 30002	0.492	0.195
Πρόσωπο	n = 87135	0.509	0.545
Παντελόνι	n = 4312	0.131	0.024
Άλογο (flamingo)	n = 25274	0.613	0.163
Bouncing (Δέντρο)	n = 30002	0.735	0.232
Χορεύτρια (Κάκτος)	n = 29909	0.645	0.199

Η εξήγηση αυτής της διαφοράς μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως η μέθοδος εξαρτάται επίσης από το είδος της παραμόρφωσης που ορίζει η επεξεργασία. Η μεταβολή του Αλόγου ώστε να θυμίζει flamingo, απαιτεί έντονη παραμόρφωση της επιφάνειας με συρρίκνωση των πίσω ποδιών και τροποποίηση του σώματος,. Αυτό σημαίνει πως τα τρίγωνα της πόζας αναφοράς μεταβάλλονται σημαντικά συγκριτικά με την κατάρρευση όπου η αλλαγή δεν είναι μεγάλη. Παρόμοια, στο παράδειγμα του Bouncing που μετατρέπεται στο Δέντρο, η αλλαγή της επιφάνειας είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του παραδείγματος του Σχήματος 4.8. Συγκρίνοντας επίσης τα παραδείγματα της Χορεύτριας, φαίνεται ξεκάθαρα πως όταν η επεξεργασία είναι έντονη ο χρόνος που απαιτείται είναι περισσότερος. Από αυτό καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η εφαρμογή των μετασχηματισμών από κάθε πόζα απαιτεί περισσότερες επαναλήψεις όταν η παραμόρφωση αλλάζει πολύ το σχήμα των τριγώνων, συγκριτικά με τα παραδείγματα όπου τα τρίγωνα δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα και έτσι μπορούν να τοποθετηθούν στις νέες τους θέσεις πιο εύκολα. Το συμπέρασμα αυτό επαληθεύεται συγκρίνοντας τα παραδείγματα των μοντέλων του Αλόγου, της Χορεύτριας και του Bouncing μεταξύ τους. Η ταξινόμησή τους με βάση

το χρόνο εκτέλεσης συμβαδίζει απόλυτα με το ποσοστό της επεξεργασίας που έχουμε επιβάλλει στην επιφάνεια της επιλεγμένης πόζας.

Τέλος, επειδή για την επίλυση του συστήματος έχουμε χρησιμοποιήσει έναν επαναληπτικό αλγόριθμο, ως αρχική εκτίμηση της λύσης για μια πόζα χρησιμοποιούμε τις τιμές των συντεταγμένων από την αμέσως προηγούμενή της. Για αυτό το λόγο, όταν η παραμόρφωση που ορίζεται από την ακολουθία είναι ομαλή ο αλγόριθμος τερματίζει σε λιγότερες επαναλήψεις από ότι σε περιπτώσεις που η πόζες είναι ανεξάρτητες, όπως συμβαίνει με το μοντέλο της Γάτας.



Σχήμα 4.15 Σχέση Διάστασης Συστήματος - Χρόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η δημιουργία ενός animation από ένα στατικό μοντέλο, είναι μια επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία, παρά την ύπαρξη ταλαντούχων animator-καλλιτεχνών. Η τροποποίηση της επιφάνειας του αντικειμένου απαιτεί συνήθως την κατασκευή μιας δομής και τη συσχέτισή της με τα δομικά του στοιχεία. Από τη μεταβολή της δομής, τα ανάλογα τμήματα της επιφάνειας παραμορφώνονται ώστε τελικά να παραχθούν νέες πόζες που αναπαριστούν διαφορετικές εκφάνσεις του μοντέλου. Ο τρόπος αυτός βρίσκει εφαρμογή σε σκελετικά αντικείμενα, που αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του 3D συνόλου. Εκτός βέβαια από αυτήν την κατηγορία αντικειμένων, όλα τα μοντέλα που δεν έχουν συγκεκριμένη δομή δημιουργούν μια δεύτερη κατηγορία. Ο μετασχηματισμός της επιφάνειάς τους απαιτεί μια διαφορετική προσέγγιση και μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους.

Ανεξάρτητα από τον τρόπο που έχει κατασκευαστεί μια ακολουθία από πόζες για ένα μοντέλο, παρουσιάστηκε η ανάγκη της ύπαρξης μιας παρόμοιας ακολουθίας για ένα δεύτερο μοντέλο. Η επανάληψη όμως της διαδικασίας που εφαρμόστηκε στο αρχικό, εκτός από ασύμφορη είναι και πολύ αναξιόπιστη γιατί το τελικό αποτέλεσμα είναι πολύ δύσκολο να αντιγράψει πειστικά τα αρχικό. Το κίνητρο αυτό, οδήγησε την έρευνα στη λύση της επαναχρησιμοποίηση των δεδομένων. Πολλές μέθοδοι ανέπτυξαν έναν αυτόματο ή ημιαυτόματο τρόπο για την παραμόρφωση ενός τελικού μοντέλου, εκμεταλλευόμενες μόνο την πληροφορία από την αρχική ακολουθία. Με οποιονδήποτε τρόπο και αν παράγουν την τελική ακολουθία, για την εφαρμογή της αρχικής παραμόρφωσης απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο καθορισμός μιας αντιστοιχίας μεταξύ των δύο μοντέλων.

Εκτός βέβαια από τη μεταβολή ενός στατικού μοντέλου σύμφωνα με μία αρχική ακολουθία, χρήσιμη είναι επίσης και η δυνατότητα τροποποίησης της ίδιας της

ακολουθίας. Όπως στην πρώτη περίπτωση ο λόγος για την κατασκευή του τελικού animation είναι η χρήση του σε μία συγκεκριμένη υπόθεση, έτσι και η ανακατασκευή της ίδιας της ακολουθίας μπορεί να την προσαρμόσει ώστε να πληροί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η επεξεργασία των χαρακτηριστικών του μοντέλου πρέπει να εφαρμόζεται επιτυχώς σε όλες τις πόζες του, με όσο το δυνατόν πιο μικρή παρέμβαση από το χρήστη. Τα δύο προβλήματα υπάγονται σε δύο διαφορετικές κατηγορίες, οι οποίες όμως δεν απέχουν ιδιαίτερα αν θεωρήσουμε πως τελικός τους στόχος είναι η κατασκευή μιας νέας ακολουθίας με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

5.1. Συνεισφορά

Με κίνητρο την επαναχρησιμοποίηση των δεδομένων, προτείναμε ένα πλαίσιο για τη μεταφορά της παραμόρφωσης από μια αρχική ακολουθία σε ένα στατικό μοντέλο και την επεξεργασία μιας υφιστάμενης ακολουθίας. Στόχος μας ήταν η γενικότητα στην εφαρμογή των μεθόδων, ώστε να μη γίνεται καμία υπόθεση για τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων και για τον τρόπο που έχουν προκύψει οι παραμορφώσεις. Η διαδικασία της μεταφοράς των παραμορφώσεων πραγματοποιείται από την εφαρμογή της Μεταφοράς Παραμόρφωσης και η τροποποίηση μιας ακολουθίας από την Επεξεργασία Ακολουθίας.

Μεταφορά Παραμόρφωσης. Το πρόβλημα της κατασκευής ενός πλήθους από πόζες για ένα τελικό μοντέλο με επαναχρησιμοποίηση, προϋποθέτει την ύπαρξη μιας αρχικής ακολουθίας. Η αρχική ακολουθία και οι πόζες αναφοράς για τα δύο μοντέλα ορίζουν την είσοδο της διαδικασίας. Τα ζητήματα που πρέπει να διευθετηθούν για την παραγωγή των αποτελεσμάτων είναι: η γενική κωδικοποίηση της παραμόρφωσης από κάθε αρχική πόζα, η αντιστοιχία μεταξύ των δύο αντικειμένων και η αποδοτική εφαρμογή της παραμόρφωσης στο τελικό.

Για το χειρισμό οποιουδήποτε είδους παραμορφώσεων, η μεταβολή από κάθε πόζα ορίστηκε ως ο μετασχηματισμός σε κάθε τρίγωνο του αρχικού αντικειμένου. Η κωδικοποίησή του έγινε με τη χρήση deformation gradients που αναπαριστούν την αλλαγή του σχήματος και της διεύθυνσης ενός τριγώνου, χωρίς να συμπεριλαμβάνουν το διάνυσμα που το μετατοπίζει στην τελική του θέση. Η παραμόρφωση του τελικού

αντικειμένου προκύπτει από την εφαρμογή της παραμόρφωσης του αρχικού σε αυτό. Επειδή όμως η παραμόρφωση έχει οριστεί στα τρίγωνα, αυτό σημαίνει πως πρέπει να καθοριστούν τα ζεύγη των τριγώνων τα οποία θα καθοδηγήσουν τη μεταφορά. Για την κατασκευή τους περιγράψαμε έναν αλγόριθμο, ο οποίος στόχο έχει να μετασχηματίσει το τελικό αντικείμενο ώστε το σχήμα του να προσαρμοστεί σε αυτό του αρχικού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της επίλυσης ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης ενέργειας, που εκφράζεται ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Έπειτα από την προσαρμογή, τα ζεύγη τριγώνων κατασκευάζονται με την εφαρμογή κριτηρίων απόστασης και διεύθυνσης. Η σχέση των τριγώνων από τα δύο αντικείμενα δεν είναι 1-1 και με αυτόν τον τρόπο επιτρέπει συσχέτιση μοντέλων με διαφορετική ανάλυση.

Η τελική μεταφορά των μετασχηματισμών επιτυγχάνεται μέσω της αντιστοιχίας. Επειδή τα deformation gradients δεν θεωρούν τη μετατόπιση, αλλά το σχήμα και τη διεύθυνση των τριγώνων, για το μετασχηματισμό του τελικού ορίσαμε ένα πρόβλημα που διατηρεί τη συνοχή του μοντέλου. Αντί να εφαρμόσουμε απευθείας τα αρχικά deformation gradients, βρήκαμε τα ιδανικά που μετασχηματίζουν κατάλληλα το τελικό, από ένα πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων για τη διαφορά τους. Το πρόβλημα είναι γραμμικό και η έξοδός του είναι οι συντεταγμένες των κορυφών. Η επίλυσή του είναι πλήρως αποδοτική και πραγματοποιήθηκε στην κάρτα γραφικών.

Επεξεργασία Ακολουθίας. Η επεξεργασία μιας ακολουθίας από πόζες εφαρμόζεται για την τροποποίησή της και στηρίζεται στην επεξεργασμένη εκδοχή μιας πόζας από το πλήθος. Σκοπός της μεθόδου που περιγράψαμε είναι η ενσωμάτωση της μεταβολής που ορίζεται από την επεξεργασία και όχι η ανάπτυξη του πλαισίου για την επεξεργασία του μοντέλου. Η είσοδος της μεθόδου είναι η πόζα αναφοράς, η ακολουθία και η επεξεργασμένη εκδοχή μιας επιλεγμένης πόζας. Για την ανακατασκευή αρχικά ορίσαμε τον τρόπο αναπαράστασης της επεξεργασίας και για την ενσωμάτωσή της στηριχθήκαμε στο πλαίσιο που περιγράψαμε στη Μεταφορά Παραμόρφωσης.

Ανεξάρτητα από τον τρόπο που προέκυψε η επεξεργασμένη πόζα, τα δομικά της στοιχεία και η συνδεσιμότητά τους παραμένουν. Ακολουθώντας τη διαδικασία με την

οποία ορίσαμε την παραμόρφωση από την πόζα αναφοράς και μια μετασχηματισμένη πόζα, έτσι και εδώ η κωδικοποίηση της επεξεργασίας γίνεται με τη χρήση deformation gradients. Επειδή αναφερόμαστε στο ίδιο μοντέλο δεν υπάρχει θέμα αντιστοιχίας. Η επεξεργασία εφαρμόζεται στα ίδια τρίγωνα αλλά δεν πραγματοποιήθηκε απευθείας σε κάθε πόζα. Αντ' αυτού εφαρμόσαμε τα deformation gradients της επεξεργασίας στην πόζα αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο για την ανακατασκευή κάθε πόζας, απαιτείται η επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης που περιγράψαμε προηγουμένως. Ως τελικό μοντέλο θεωρήσαμε τη μετασχηματισμένη πόζα και ως αρχική παραμόρφωση τα deformation gradients από την αρχική ακολουθία. Η επίλυση του συστήματος έγινε επίσης στην κάρτα γραφικών.

5.2. Επεκτάσεις

Η εφαρμογή των μεθόδων σε ένα πλήθος παραδειγμάτων απέδειξε τη γενικότητά τους, αλλά παράλληλα έφερε στο φως και νέες κατευθύνσεις στις οποίες μπορούμε να κινηθούμε για την περεταίρω επέκτασή τους. Καταρχάς οι περιορισμοί μπορούν από μόνους τους να θεωρηθούν ως μελλοντικές βελτιώσεις. Επίσης, ο συνδυασμός των μεθόδων με άλλες κατευθύνσεις μπορεί να δώσει ενδιαφέρουσες τεχνικές. Κάποιες επεκτάσεις της μεθόδου της μεταφοράς των παραμορφώσεων έχουν ήδη υλοποιηθεί και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 1. Παρακάτω θα προτείνουμε ένα σύνολο από πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις για τις δύο τεχνικές.

Όσον αφορά τη Μεταφορά Παραμόρφωσης, ένας σημαντικός περιορισμός και παράλληλα μια χρήσιμη επέκταση είναι η προϋπόθεση της ομοιότητας των ποζών αναφοράς. Ακόμη και στην περίπτωση που τα δύο μοντέλα είναι όμοια ως προς τη δομή, όταν οι πόζες αναφοράς τους διαφέρουν ως προς την κινησιολογία, τα αποτελέσματα που παράγονται δεν ανταποκρίνονται στα αρχικά. Στην εργασία [21] προτείνεται μια τεχνική για αντιμετώπιση του προβλήματος, αλλά έχει εφαρμογή μόνο σε σκελετικά μοντέλα. Για τη γενική αντιμετώπιση του προβλήματος, μια πιθανή λύση είναι ο έλεγχος του αρχικού animation ώστε να βρεθεί μία πόζα που έχει μικρή διαφορά από την πόζα αναφοράς του τελικού. Με εφαρμογή ενός αλγορίθμου μετασχηματισμού της επιφάνειάς της, το σχήμα των δύο ποζών μπορεί να ταιριάζει

κατά το μέγιστο δυνατό. Το πρόβλημα βέβαια της προσέγγισης αυτής μεταφέρεται στην εύρεση της κατάλληλης πόζας.

Ένας ακόμη περιορισμός που οδηγεί στην παραγωγή λανθασμένων αποτελεσμάτων, είναι η έλλειψη ελέγχου για αποφυγή αυτοτεμνόμενων τμημάτων. Τόσο στη Μεταφορά Παραμόρφωσης, όσο και στην Επεξεργασία Ακολουθίας η επίλυση απλά αντιγράφει την παραμόρφωση της αρχικής ακολουθίας. Με αυτόν τον τρόπο είναι αδύνατον να αποφευχθεί η περίπτωση όπου περιοχές στις πόζες τέμνονται μεταξύ τους, αφού ουσιαστικά τα deformation gradients εφαρμόζονται σε κάθε τρίγωνο. Για να διευθετηθεί το πρόβλημα μία λύση είναι η εκ των υστέρων διόρθωση κάθε πόζας. Το μοντέλο θα μπορούσε να τμηματοποιηθεί και να γίνει έλεγχος για τους συνδυασμούς των τμημάτων. Όμως, η περίπτωση των μη-σκελετικών σχημάτων δυσκολεύει την εξεύρεση γενικής και παράλληλα αποδοτικής λύσης.

Παρόμοια με την ιδέα του ελέγχου των τμημάτων για την παραγωγή ορθών αποτελεσμάτων, η μέθοδος που παράγει τις τελικές πόζες μπορεί να κατασκευαστεί ώστε να διατηρεί τον όγκο της πόζας αναφοράς του μοντέλου. Έχουν προταθεί κάποιες τεχνικές για διατήρηση του όγκου όπως η [4]. Ο συνδυασμός τους με την μεταφορά της παραμόρφωσης, όπου αυτό είναι επιθυμητό, το πιο πιθανό είναι να κοστίζει τη γραμμικότητα του συστήματος επίλυσης. Επίσης, μεγάλη είναι η πιθανότητα ο όγκος να διατηρείται μόνο με εκ των υστέρων επεξεργασία.

Τέλος, ενδιαφέρουσα φαίνεται και η ιδέα για μεταφορά της παραμόρφωσης που ορίζεται από την πληροφορία της διαδικασίας του skinning για ένα μοντέλο. Ως skinning ορίζεται η κωδικοποίηση των μετασχηματισμών ενός μοντέλου, σαν ο γραμμικός συνδυασμός των κορυφών της πόζας αναφοράς και κάποιων πινάκων και βαρών για κάθε πόζα. [11], [12]. Επειδή με skinning ενός animation καταφέρνουμε να κωδικοποιήσουμε τους μετασχηματισμούς για κάθε πόζα, δεν αποθηκεύουμε την πληροφορία της αλλά υπολογίζουμε τις κορυφές της σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο είναι σαν να συμπιέζουμε τα αρχικά δεδομένα. Έτσι η μεταφορά της παραμόρφωσης του skinning σε ένα δεύτερο μοντέλο παράγει τη νέα ακολουθία, ενώ ταυτόχρονα έχει πραγματοποιήσει και συμπίεση.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] A. H. Barr. “Global and local deformations of solid primitives”, SIGGRAPH, Vol. 18(3), pp 21-30, January 1984.
- [2] C. Hecker, B. Raabe, R. W. Enslow, J. D. Weese, J. Maynard, K. van Prooijen. “Real-time motion retargeting to highly varied user-created morphologies”, ACM SIGGRAPH, Vol. 27(3), pp 1-11, August 2008.
- [3] D. Lue, X. Ye, G Zhou. “Animating by example”, Computer Animation and Virtual Worlds, Vol. 18(4-5), pp 247-257, September 2007.
- [4] D. Rohmer, S. Hahmann, M. P. Cani. “Exact volume preserving skinning with shape control”, ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, Vol. pp 83-92, 2009.
- [5] H. Chu, C. Lin. “Example-based deformation transfer for 3D polygon models”, J. Inf. Sci. Eng. , pp 379-391, 2010.
- [6] I. Baran, D. Vlastic, E. Grinspun, J. Popovi. “Semantic deformation transfer”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 28(3), pp 1-6, August 2009.
- [7] I. Baran, J. Popovic. “Automatic rigging and animation of 3D characters”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 26(3), July 2007.
- [8] J. Y. Noh, U. Neumann. “Expression cloning”, ACM SIGGRAPH, 2006.
- [9] K. Zhou, W. Xu, Y. Tong, M. Desbrun. “Deformation transfer to multi-component objects”, EUROGRAPHICS, Vol. 29(2), pp 319-325, May 2010.
- [10] L. Chen., J. Huang, H. Sun, H. Bao. “Cage-based deformation transfer”, In Proceedings of Computers & Graphics, pp 107-118, 2010.
- [11] L. Kavan, P.P. Sloan, C. O’Sullivan. “Fast and efficient skinning of animated meshes”, EUROGRAPHICS, Vol. 29(2), pp 327-336, May 2010.
- [12] L. Kavan, R. McDonnell, S. Dobbyn, J. Zara, C. O’Sullivan. “Skinning arbitrary deformations”, Proceedings of the 2007 symposium on Interactive 3D graphics and games, 2007.

- [13] M. Ben-Chen, O. Weber, C. Gotsman. "Spatial deformation transfer", ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp 67-74, 2009.
- [14] M. Ben-Chen, O. Weber, C. Gotsman. "Variational harmonic maps for shape deformation", ACM Transactions on Graphics, Vol 28(3), pp 1-11, August 2009.
- [15] P. Alliez, D. Cohen-Steiner, M. Yvinec, M. Desbrun. "Variational tetrahedral meshing", ACM Transactions on Graphics, Vol. 24(3), pp. 617-623, July 2005.
- [16] R.W. Sumner, J. Popovic. "Deformation transfer for triangle meshes", ACM SIGGRAPH, Vol. 23(3), pp 399-405, August 2004.
- [17] R. W. Sumner, J. Schmid, M. Pauly. "Embedded deformation for shape manipulation", ACM Transactions on Graphics, Vol. 26(3), July 2007.
- [18] R.W. Sumner, M. Zwicker, C. Gotsman, J. Popovic. "Mesh-based inverse kinematics", ACM SIGGRAPH, Vol. 24(3), pp 488-495, July 2005.
- [19] S. Kircher, M. Garland. "Editing arbitrarily deforming surface animations", ACM Transactions on Graphics, Vol 25(3), pp 1098-1107, July 2006.
- [20] T. Ju, S. Schaefer, J. Warren. "Mean value coordinates for closed triangular meshes", ACM Transactions on Graphics, Vol. 24(3), pp 561-566, July 2005.
- [21] T. Y. Lee, Y.S. Wang, T. G. Chen. "Segmenting a deforming mesh into near rigid components", The Visual Computer, Vol. 22(9), pp 729-739, September 2006.
- [22] W. Xu, K. Zhou, Y. Yu, Q. Tan, Q. Peng, A. Guo. "Gradient domain editing of deforming mesh sequences", ACM Transactions on Graphics, Vol. 26(3), July 2007.
- [23] Y. Jia, W. Feng, Y. Yu. "Transplanting and Editing Animations on Skinned Meshes", Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, pp 431-434, 2007.
- [24] Y. Lipman, D. Levin, D. Cohen-Or. "Green coordinates". ACM Transactions on Graphics, Vol 27(3), pp 1-10, August 2008.
- [25] Y. S. Wang, T.Y. Lee. "Example-driven animation synthesis", Visual Comput, Vol. 24(7), pp 765-773, July 2008.
- [26] Y. T Chang, B.Y. Chen, W.C. Luo, J. B. Huang. "Skeleton-driven Animation Transfer based on Consistent Volume Parameterization", Proceedings of Computer Graphics International, pp.78 - 89, 2006.

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

Ο Άγγελος Λάζος γεννήθηκε στα Ιωάννινα το 1987. Αποφοίτησε από το Μαρούλειο Ενιαίο Λύκειο το 2005 και εισήχθει στο τμήμα Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων την ίδια χρονιά. Αποφοίτησε το 2009 και συνέχισε τις μεταπτυχιακές του σπουδές στο ίδιο τμήμα επίσης το ίδιο έτος. Τα ενδιαφέροντά του περιλαμβάνουν animation και σχεδίαση 3D αντικειμένων.