Geometrische Formen in Vektorfeldern

Kontinuierliche Deformationen und
Oberflächen-basierte Strömungsvisualisierungen

Janick Martinez Esturo

Max Planck Institut für Informatik, Saarbrücken

Geometrischen Formen haben sich zu einem unverzichtbaren Kernbestandteil in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten entwickelt. Hierzu zählen die digitale Entwicklung und Fertigung industrieller Produkte sowie Anwendungen in der Medizin, Architektur und der Unterhaltungsindustrie, um nur einige Beispiele zu nennen. Das Forschungsfeld der Geometrieverarbeitung beschäftigt sich als Teilgebiet der Informatik mit der effektiven computergestützten Verarbeitung von geometrischen Formen.

In der vorgestellten Dissertation werden neue Lösungen für offene Probleme der Geometrieverarbeitung über *kontinuierliche* Beschreibungen mit Hilfe von *Vektorfeldern* vorgeschlagen und untersucht. Die Arbeit gliedert sich dabei in zwei Teile: Im ersten Teil werden Vektorfelder zur effektiven *Manipulation* von geometrischen Formen genutzt. Dabei werden kontinuierliche Deformationen sowohl zur interaktiven Modellierung als auch zur Optimierung von geometrischen Formen genutzt. In dem zweiten Teil der Dissertation werden Vektorfelder nicht mehr zur Repräsentation von Deformationen genutzt. Stattdessen werden sie als Strömungsfelder interpretiert, die charakteristische geometrische Formen, wie beispielsweise Stromflächen, *definieren*, und zur Visualisierung dieser komplexen Vektorfelder genutzt werden.

Die in diesem Artikel vorgestellte Dissertation [Mar13] wurde von der Fakultät für Informatik der Universität Magdeburg angenommen und die vorgeschlagenen Beiträge in begutachteten internationalen Konferenzbänden und Zeitschriften veröffentlicht.

1 Einleitung

Jahrzehntelang wurden Medien ausschließlich von Text dominiert. Danach wurde das Konzept der Multi-Media in Form von Bildern, Tönen und Videos eingeführt. Erst kürzlich haben sich Modelle für *geometrischen Formen* von Objekten zu einer wichtigen neuen Form von digitalen Medien entwickelt. Digitale Repräsentationen von geometrischen Formen sind allgegenwärtig. Ihre Relevanz für eine Vielzahl von wirtschaftlichen Anwendungsbereichen steigt stetig an. Beispielsweise tragen anspruchsvolle Methoden auf Basis geometrischer Daten im industriellen Design dazu bei Produkte zu verbessern und gleichzeitig deren Kosten zu senken. Auf die gleiche Weise beruhen ganze wissenschaftliche Teilbereiche, wie bspw. die Visualisierung oder die computergestützte Medizin, maßgebliche auf der Erforschung verschiedener Objektrepräsentationen von realen oder simulierten Geometrien für die Entdeckung und Entwicklung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse.

Die Bedeutung von geometrischen Formen ist eng mit der Notwendigkeit von entsprechenden Algorithmen und Datenstrukturen verbunden, die für deren effektive Verarbeitung erforderlich sind. In der Informatik studiert der Bereich der *digitale Geometrieverarbeitung* als Teilgebiet der Computergrafik Methoden für die Verarbeitung von geometrischen Formen, die sowohl effizient als auch skalierbar sind. Die numerische Verarbeitung von geometrischen Formen bildet den Kern der geometrischen Modellierung. Eine Vielzahl an effektiven Methoden sind bspw. für die Erfassung, Analyse und Speicherung von geometrischen Formen bekannt [BKP*10].

Die in diesem Artikel vorgestellte Dissertation [Mar13] befasst sich mit der *Manipulation* von geometrischen Formen, d.h. mit der zielgerichteten Modifikation der Geometrie von Formen. Modifikationen können dabei entweder interaktiv durch den Benutzer zur persistenten *Modellierung* von Formen genutzt werden, oder zur *Optimierung* von Formen durch automatische Methoden, die keine Nutzerinteraktion benötigen. Die Modellierung von Formen ist ein klassisches und gleichzeitig sehr anspruchsvolles Problem in der digitalen Geometrieverarbeitung, da die oftmals komplexen Deformationsmethoden interaktiv ausgeführt und hinter intuitiv zu bedienenden Nutzerschnittstellen verborgen sein müssen. Auf der anderen Seite ist die Optimierung von Formen in der Regel ein Offline-Prozess, der jedoch ein noch höheres Maß an Robustheit und Genauigkeit der Lösung garantieren muss.

Die Manipulation von Formen ist eng verbunden mit ihren digitalen Repräsentationen und dem verwendeten Deformationsparadima. Geometrische Formen werden typischerweise als Punktmengen interpretiert und in Abhängigkeit der vorhandenen Daten und der beabsichtigten Anwendung repräsentiert, wobei explizite und implizite Formrepräsentationen am üblichsten sind. Unabhängig von der Formrepräsentationen ist das verwendete Deformationsparadima: Klassischerweise werden Deformationen als Abbildungen der Form (oder deren Umgebenen Raum) auf eine deformierte Variante modelliert, wobei diese Deformationen in einem einzelnen Schritt berechnet werden. Lineare und nichtlineare Methoden dieses "Einzelschritt"-Paradigmas sind gut erforscht.

Im Kontrast klassischen Einzelschritt-Modellen werden in diese Arbeit *kontinuierliche* Manipulationen studiert, d.h. Abbildungen der Formen, die durch eine kontinuierlich parametrisierte Familie von Deformationen repräsentiert sind. Bis jetzt haben kontinuierliche Deformationen wenig Aufmerksamkeit in der Forschung erhalten, obwohl eine Reihe von klassischerweise schwierigen nichtlinearen Problemen, wie bspw. die Berechnung von volumenerhaltenden Deformationen, in diesem Framework sehr natürliche Lösungen besitzen. Ein eleganter Weg um kontinuierliche Deformationen zu definieren ist die Verwendung von *Vektorfeldern*, die die Deformationen durch Integration der Formen entlang dieser Geschwindigkeitsfelder leiten. Im Rahmen der Dissertation werden Vektorfeld-basierte Deformationen von explizit und implizit definierten Formen studiert und sowohl zur Modellierung als auch zur Optimierung von geometrischen Formen eingesetzt. Es wird gezeigt, wie mit Hilfe der neu entwickelten Methoden Lösungen bisher offener Probleme der geometrischen Modellierung erhalten werden können und die Qualität bisheriger Deformationsansätze noch weiter gesteigert werden kann. Kontinuierliche Deformationen sind der Schwerpunkt des ersten Teils dieser Dissertation, in dem sowohl neue Vektorfeld-Energien und korrespondierende Typen von Deformationen als auch neue Anwendungen für kontinuierliche Deformationen vorgestellt werden.

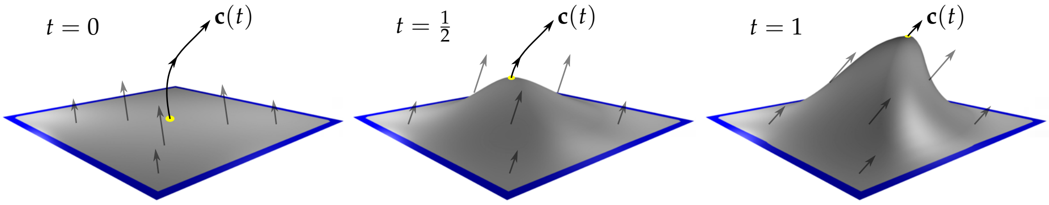


Abbildung 1: Kontinuierliche Vektorfeld-basierte Deformation. Eine kleine Griffregion (•) wird kontinuierlich entlang einer vom Benutzer vorgegebene Leitkurve $\mathbf{c}(t)$ bewegt, während der Rand (•) der Oberfläche fixiert bleibt. Für jeden Integrationsschritt zum Zeitpunkt t ist die aktuelle Oberflächengeometrie und die erzwungenen Vektoren (•) gegeben, während das übrige Vektorfeld (•) berechnet werden muss, bspw. durch eine globale Energieminimierung.

In der Regel sind Vektorfelder von kontinuierlichen Deformation nicht von vornherein gegeben, sondern müssen auf eine problemspezifische Weise berechnet werden, etwa um möglichst wenig Verzerrung zu induzieren. Darüber hinaus kann das abstrakte Vektorfeld-Konzept zudem noch weitere Typen von Feldern beschreiben: Vektorfelder eignen sich bspw. besonders gut zur Repräsentation der Geschwindigkeitsfelder von komplexen Strömungen. Die Analyse der Eigenschaften dieser Strömungsfelder ist von besonderem Interesse für verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, etwa im Maschinenbau. Im Gegensatz zum ersten Teil der Dissertation sind Strömungsfelder entweder gemessen bzw. simuliert. Insbesondere sind sie a priori für die Analyse gegeben und werden im Zuge dessen nicht, wie im ersten Teil der Arbeit, modifiziert. Als Teilgebiet der Computergrafik konzentriert sich die *Strömungsvisualisierung* auf die Berechnung von abstrakteren und charakteristischeren Repräsentationen von Strömungsfeldern um die Analyse von komplexen Flussphänomenen zu vereinfachen. Unter den verschiedenen Typen von Strömungsvisualisierungen beruhen die Geometrie-basierten Methoden auf geometrischen Formen zur Visualisierung von Flusseigenschaften. Im Allgemeinen sind diese Formen durch die Strömungsfelder *definiert*. Durch Vektorfelder definierte geometrische Formen werden im zweiten Teil der Dissertation untersucht. Dabei wird gezeigt, wie bekannte Methoden aus dem verwandten Gebiet der Geometrieverarbeitung zur Verbesserung von Geometrie-basierten Strömungsvisualisierungen eingesetzt werden können.

In den folgenden Abschnitten werden die wissenschaftliche Hauptbeiträge der vorgestellten Dissertation kurz erläutert und mit anschaulichen Beispielen illustriert.

2 Vektorfeld-basierte *Manipulation* Geometrischer Formen

Im Rahmen des ersten Teiles der vorgestellten Dissertation werden kontinuierliche Deformationen für verschiedene Typen von geometrischen Formen und für verschiedene Manipulationsziele entwickelt. Die wichtigsten Beiträge werden im Folgenden dargestellt.

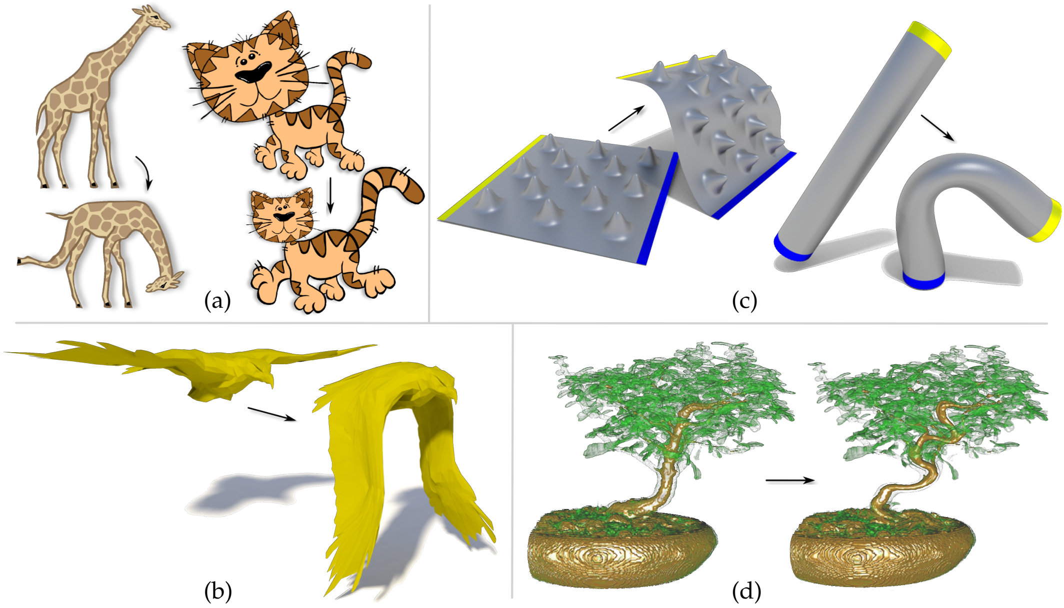


Abbildung 2: *Kontinuierliche* Deformationen verschiedener Formrepräsentationen. (a) Isometrische und konforme Deformationen von 2*d* Formen [MRT13]. (b) Isometrische Deformationen von volumetrischen 3*d* Körpern [MRT13]. (c) Isometrische Deformationen von Oberflächen [MRT12]. (d) Volumenerhaltende Deformationen von Isoflächen [MRT10].

2.1 Generalisierte Vektorfeld-Energien

Jede Vektorfeld-basierte Deformation wird über eine kontinuierliche Raumzeit-Integration einer initialen geometrischen Form beschrieben. Abbildung 1 illustriert dieses Konzept. In der Regel werden Vektorfelder hierfür durch globalen Energieminimierungen berechnet und mit Hilfe von numerischen Verfahren integriert (siehe bspw. [SBB*11]).

In Abhängigkeit der spezifischen Formrepräsentation und des konkreten Modellierungsproblems werden verschiedene Typen von Vektorfeldern benötigt: Hierfür wird im Rahmen der Dissertation eine Familie *generalisierter Vektorfeldenergien* eingeführt, die Approximationen von *isometrischen*, *konformen*, sowie *volumenerhaltenden* kontinuierlichen Deformationen von planaren und volumetrischen Formen ermöglicht [MRT13]. Diese generalisierte Energie ist die erste Formulierung plastischer kontinuierlicher Deformationen in der Modellierung, die das gesamte Spektrum an geometrischen Deformationen beschreiben kann. Interessanterweise kann diese Energie über einen einzelnen Freiheitsgrad parametrisiert werden und unterstützt darüber hinaus inhomogene und anisotrope Materialeigenschaften. Im Kontrast zu elastischen Deformationen klassischer Einzelschritt-Verfahren müssen keine globalen nichtlinearen Optimierungen ausgeführt werden, da sich die Vektorfeldoptimierungen als globale lineare Probleme formulieren lassen. Durch die Einführung des neuen Konzeptes der Energieglattheit wird eine hohe Qualität der Deformationen erreicht, die selbst modernste nichtlineare Standardverfahren übertreffen kann. Um Interaktivität und

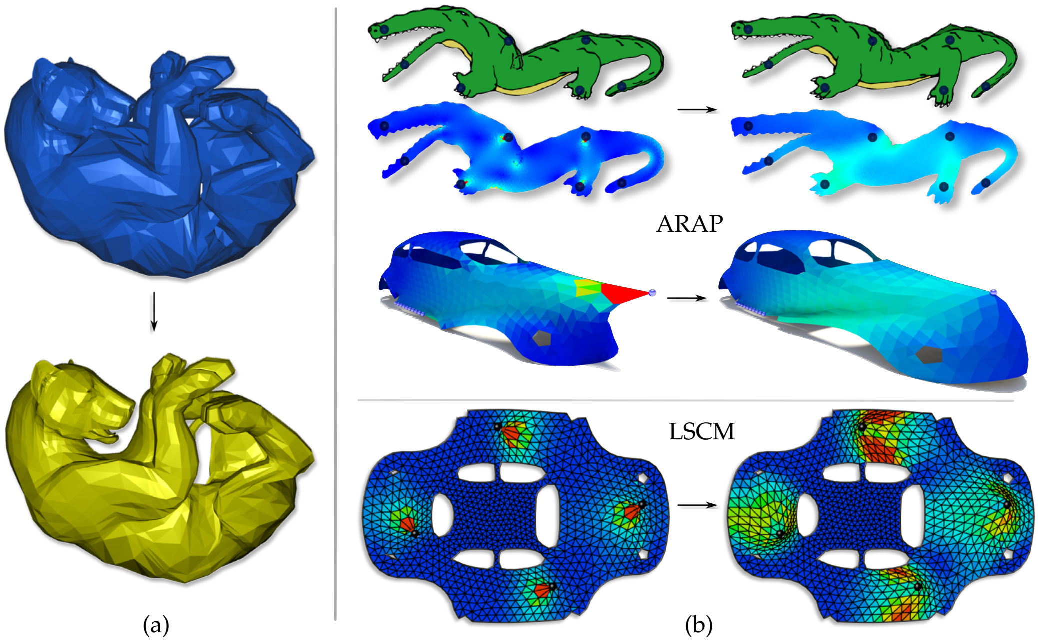


Abbildung 3: Optimierung von Formrepräsentationen und Geometrieverarbeitungsmethoden. (a) Kontinuierliche Deformationen werden zur *Korrektur* von artefaktbehafteten Posen (•) genutzt: die korrigierte Pose (•) ist frei von *Selbstüberschneidungen* [MRF*11]. (b) Ein generischer und problemspezifischer linearer *Regularisierungsansatz* erhöht die Effektivität einer Vielzahl von Geometrieverarbeitungsmethoden. Beispielsweise können Artefakte in etablierten und weit verbreiteten ARAP Deformationen und in konformen LSCM Parametrisierungen verhindert werden [MRT14].

Skalierbarkeit zu gewährleisten werden darüber hinaus große Teile der Berechnungen parallelisiert auf der Grafikkarte (GPU) ausgeführt. Abbildung 2 (a) zeigt Beispiele für planare isometrische und konforme 2*d* Deformationen und Abbildung 2 (b) zeigt ein Beispiel einer isometrischen Deformation eines volumetrischen 3*d* Körpers. Planare Formen werden dabei durch Netze von Dreiecken und volumetrische Körper durch Netze von Tetraedern diskretisiert.

2.2 Isometrische Deformationen von Oberflächen

Über die generalisierten Vektorfeldenergien lassen sich Deformation hoher Qualität berechnen. Unglücklicherweise unterstützt die mathematische Formulierung dieser Energien nur planare und volumetrische Formen, jedoch keine Deformationen von Oberflächen. Da durch Netze von Dreiecken diskretisierte Oberflächen von besonderer praktischer Bedeutung sind wird in der Dissertation eine neue Energie vorgeschlagen, die auch diesen Typ von geometrischer Form unterstützt. Diese Energie beschreibt den wichtigen isometrischen Deformationstyp indem Vektorfelder optimiert werden, die lokal so nah wie möglich zu *starren Transformationen* sind und global eine glatte Variation besitzen [MRT12]. Wie zuvor bedarf es nur linearer Minimierungen um global optimale Vektorfelder zu erhalten. Die Berechnungen können wieder durch die GPU parallelisiert werden, wobei sich der vorgeschlagene generische Ansatz zum parallelisierten Aufsetzen der linearen Systeme auch zur Beschleunigung anderer zellbasierter Verfahren anwenden lässt, bspw. für Simulationsmethoden basierend auf finiten Elementen. Die Qualität der Ergebnisse kann lineare sowie nichtlineare State-of-the-Art Methoden durchgängig übertreffen (vgl. [BPG*06; BS08]). Abbildung 2 (c) zeigt Beispiele für isometrische Oberflächendeformationen, die durch diese Energieformulierung erhalten werden.

2.3 Volumenerhaltende Deformationen von Isoflächen

Die zuvor beschriebenen kontinuierlichen Deformationen unterstützen nur *explizit* definierte planare und volumetrische Formen sowie Oberflächen. Für viele Probleme in der Computergrafik sind jedoch *implizit* definierte Formen besser geeignet, bspw. eignen sich Isoflächen, die als Isokonturen eines Skalarfeldes definiert sind, besonders zur Rekonstruktion von gescannten Oberflächen. Auch gegenüber klassischen Deformationsverfahren, die in der Regel nur eine einzelne Isofläche manipulieren können, haben Vektorfeld-basierte Deformationen eine Reihe von Vorteile für diesen Formtyp: Im Rahmen der Dissertation wird eine neue Deformationsmethode vorgeschlagen, die unter Verwendung von global *divergenzfreien Vektorfeldern* garantieren kann, dass sich das eingeschlossene Volumen einer Isofläche nicht ändert [MRT10]. Dies gilt nicht nur für eine einzelne Isofläche, sondern für *jede* in dem Volumen vorhandene Isofläche. Da viele gebräuchliche Materialien ihr Volumen unter Deformationen approximativ erhalten ist die Eigenschaft der Volumenerhaltung geeignet plausible Deformationen zu beschreiben. Darüber hinaus kann die Erhaltung der Topologie jeder Isofläche garantiert werden. Da die genutzten divergenzfreien Vektorfelder unabhängig vom zugrundeliegenden Skalarfeld sind kann zudem ein neu entwickeltes, sehr effizientes und genaues Integrationsschema namens "rückwärts-Lagrangian Integration" verwendet werden. Dieses wird durch die GPU parallelisiert ausgeführt und garantiert damit Interaktivität der Deformationen. Zudem können Isoflächen-Diskretisierungen hoher Qualität jederzeit durch eine Offline-Rekonstruktion berechnet werden. Experimentelle Ergebnisse belegen die theoretisch gezeigten Eigenschaften der Volumen- und Topologieerhaltung selbst für extreme Deformationen. Abbildung 2 (d) zeigt ein Beispiel für eine volumenerhaltende Isoflächendeformation des Stammes eines gescannten Bonsai-Baumes.

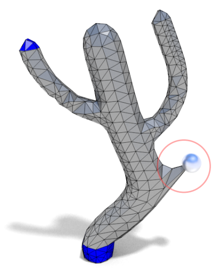
2.4 Posen-Korrektur durch Raumzeit-Integration

Eine Vielzahl von Modellierungsmethoden nutzt Beispieldaten in Form von verschieden deformierten Posen ein und desselben Objektes um neue Ergebnisse abzuleiten (siehe bspw. [FB11]). Die Effektivität dieser Verfahren leidet jedoch stark unter Posen mit geometrischen Inkonsistenzen, z.B. in Form von lokalen Selbstüberschneidungen. Da Posen eine feste paarweise Konnektivität besitzen müssen können keine Standardverfahren zur Korrektur der Artefakte eingesetzt werden, da diese die Konnektivität modifizieren würden. Dieses offene

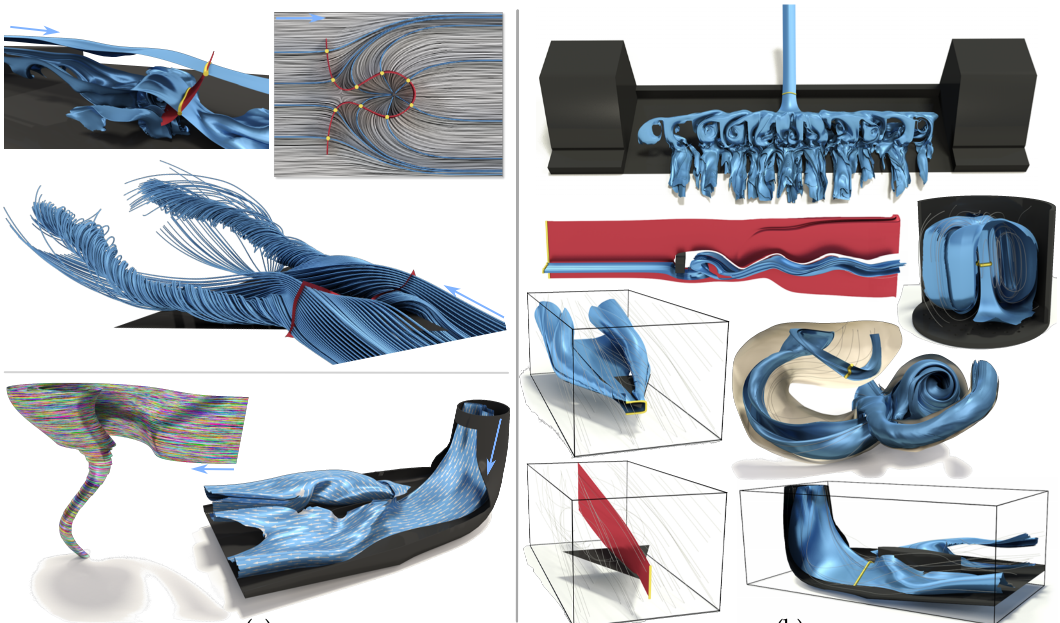
Problem der Modellierung kann dabei elegant durch einen Vektorfeld-basierten Ansatz gelöst werden indem eine grundlegende Eigenschaft von integrations-basierten Systemen ausgenutzt wird: Die Fronten von Pfadlinien schneiden sich zu keinem Zeitpunkt in Raumzeit. In der Dissertation erlaubt dies die Formulierung des ersten deformations-basierten Ansatzes zur *Optimierung* von Artefakten in Posendatenbanken, der Konnektivität nicht modifiziert [MRF*11]. Dazu wird ein *Raumzeit-Vektorfeld* so an die Geometrie gefittet, dass Integration der Referenzpose in diesem Feld *korrigierte Posen* beschreibt, die frei von geometrischen Artefakten sind. Die korrigierten Posen werden dabei nur lokal modifiziert um frei von Selbstüberschneidungen zu sein und reproduzieren global die originale Posengeometrie. Abbildung 3 (a) zeigt das Ergebnis einer automatischen Korrektur einer Pose eines Löwenmodells, das initial eine hohe Anzahl an Selbstüberschneidungen aufweist. Technisch werden die Raumzeit-Vektorfelder dabei durch 4-dimensionale radiale Basisfunktionen (RBFs) repräsentiert, deren Berechnung zum einen durch Auslagerung von Operationen auf die GPU beschleunigt wird. Zum anderen wird zusätzlich ein neues Selektionsschema für RBF-Zentren vorgestellt, welches eine höhere Konvergenzrate und numerische Stabilität im Vergleich zu bisherigen Standardverfahren bietet. Gekoppelt mit einer neuen Formulierung für die Aktualisierung der Faktorisierungen der linearen RBF-Systeme ergibt sich so ein neuer generischer RBF-basierter Approximationsansatz, der effizient und effektiv ist. Dieses Schema eignet sich dabei nicht nur zur Vektorfeld-basierten Posenkorrektur sondern ist zur Approximation *beliebiger* hochdimensional verstreuter Daten einsetzbar.

2.5 Geglättete Energien für die Geometrieverarbeitung

Eine Großteil an Methoden der Geometrieverarbeitung beruht auf dem Prinzip der Energieminimierung: Problemspezifische Energien werden so formuliert, dass Minimierer dieser Funktionale die gesuchten global optimalen Lösungen der Probleme sind. Oftmals kommen dabei quadratische Energien zum Einsatz, die zu effizient zu berechnenden linearen Optimierungsproblemen führen. Einige Beispiele sind die Berechnung von Einzelschritt-Deformationen verschiedener Formtypen, Parametrisierungen von Oberflächen oder die oben beschriebenen Vektorfeld-basierten kontinuierlichen Deformationen.



Vieler dieser Methoden generieren dabei Resultate, die in der Nähe der Nutzerbedingungen Artefakte wie Diskontinuitäten der Lösungen aufweisen, da die Energien in der Regel keine Glattheitseigenschaften beschreiben (siehe Einschub rechts). Doch selbst wenn Glattheit der Lösungen über Standardregularisierungen in der Optimierung erzwungen wird können viele der Artefakte nicht korrigiert werden, da diese Art von Regularisierung unabhängig von der konkret optimierten Energie ist. Um dieses sehr allgemeine und weitgreifende Problem der Geometrieverarbeitung zu lösen wird im Rahmen der Dissertation die erste generische Regularisierung vorgeschlagen, die nicht auf der Glättung der Lösung, sondern auf der *Glättung der optimierten Energie* selbst beruht [MRT14]. Diese neue Form von Regularisierung ist daher direkt abhängig von der betrachteten Energie, sie ist somit *problemspezifisch*. Für eine Vielzahl von verschiedenen Problemen kann dabei die Effektivität dieses einfachen aber mächtigen Konzeptes demonstriert werden. Abbildung 3 (b)



(a) (b)

Abbildung 4: Oberflächen-basierte Flussvisualisierung. (a) Über *Poisson-basierte Deformationen* werden interaktiv Oberflächen positioniert, die entlang oder orthogonal zum Fluss ausgerichtet sein können. Orthogonale Flächen (•) eignen sich besonders zur Definition von Saatstrukturen (•) von exakt integrierten Geometrien (•) (oben). *Poisson-basierte Parametrisierungen* ermöglichen zudem effiziente illustrative Visualisierungen (unten) [MSR*13b]. (b) Die Einführung des ersten globalen und *differentialgeometrischen Qualitätsmaßes* für Stromflächen ermöglicht darüber hinaus die vollkommen *automatische Selektion* [MSR*13a].

zeigt mit problemspezifischen Regularisierungen optimierte Ergebnisse von planaren und Oberflächen-basierten Deformationen etablierter nichtlinearer *as-rigid-as-possible* (ARAP) Deformationen und konformen *least-squares conformal maps* (LSCM) Parametrisierungen (siehe [LPR*02; LZX*08]). Dabei ist diese Form der linearen Regularisierung sehr einfach und generisch zu implementieren und zeigt keine signifikanten Steigerungen der Laufzeiten. In vielen Fällen weist sie die gleiche Qualität komplexer zu berechnender nichtlinearer Regularisierungen auf und kann diese oftmals sogar übertreffen. Da diese Eigenschaften der vorgestellten generischen Regularisierung potentiell die Effektivität eines Großteils der etablierten Geometrieverarbeitungsmethoden (und die Methoden weiterer Forschungsfelder, die Energieminimierungen zur Problemlösung nutzen) erhöhen kann ist sie eine der wichtigsten Beiträge der vorgestellten Dissertation.

3 Vektorfeld-basierte *Definition* Geometrischer Formen

Nachdem im ersten Teil der Dissertation Manipulationen von Formen durch Vektorfelder betrachtet wurden fokussiert sich der zweite Teil der Arbeit auf Probleme der Strömungsvisualisierung in denen geometrische Formen durch Vektorfelder definiert werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Beiträge zur Strömungsvisualisierung zusammengefasst.

3.1 Poisson-basierte Methoden für Oberflächen-basierte Strömungsvisualisierung

Geometrie-basierte Ansätze der Strömungsvisualisierung nutzen unterschiedliche Typen von *integrierten* geometrischen Formen verschiedener Dimensionalität, darunter Partikel, Integralkurven sowie Integralflächen. Auf Grund ihrer höheren intrinsischen Dimensionalität kann bereits eine geringe Anzahl von Integralflächen selbst komplexe Strömungsphänomene gut beschreiben. Integralflächen in stationären Strömungen werden *Stromflächen* genannt. Klassischerweise werden sie aus dem Vektorfeld extrahiert in dem sie von definierenden *Saatkurven* aus entlang des Feldes integriert werden. Nutzer können Saatkurven manipulieren um interessante Stromflächen zu selektieren. Leider ist jedoch gerade die Selektion von repräsentativen Stromflächen eine zeitaufwändige und mühsame Aufgabe, da die Integration der Flächen nur schwer vorherzusagen ist.

Um Nutzer bei der interaktiven Selektion von Stromflächen zu unterstützen wird daher in der Dissertation die erste Extraktionsmethode für Strom-ausgerichteten Flächen vorgeschlagen, die *nicht* wie klassische Ansätze integrations-basiert ist. Stattdessen wird ein neuer *deformations-basierter* Ansatz zur Extraktion Strom-ausgerichteter Flächen vorgeschlagen [MSR*13b]: Nutzer können direkt mit ganzen Flächen interagieren, die sich automatisch deformieren und interaktiv an der lokalen Strömung ausrichten. Erstmalig werden dabei aus der Geometrieverarbeitung wohlbekannte Poisson-basierte Problembeschreibungen auf Probleme der Strömungsvisualisierung angewendet. Mit diesen Techniken können sowohl klassische Stromflächen als auch i.A. nicht integrierbare Strom-orthogonale Flächen extrahiert werden, die sich besonders zur Definition von Saatstrukturen eignen. Darüber hinaus werden mit dem gleichen Poisson-basierten Framework effizient Parametrisierungen von Stromflächen berechnet, die illustrative Visualisierungen der Strömung auf der Fläche ermöglichen. Abbildung 4 (a) zeigt Beispiele für interaktiv positionierte strom-ausgerichtete Flächen in verschiedenen komplexen Strömungsdatensätzen sowie Ergebnisse für parametrisierungs-basierte illustrative Strömungsvisualisierungen.

3.2 Automatische Globale Selektion von Stromflächen

Die zuvor beschriebenen Poisson-basierten Methode vereinfachen die manuelle Exploration von Strömungen. Dieses interaktive Verfahren wird nun durch einen neuen Ansatz komplementiert, der erstmals eine vollkommen *automatische Selektion* von global charakteristischen Stromflächen erlaubt. Die automatische Selektion von Stromflächen ist ein wichtiges jedoch bis dahin ungelöstes Problem der Visualisierung, welches bspw. die unbeaufsichtigte Analyse von simulierten Strömungen ermöglicht. Dieses Problem ist komplex, da der Raum der möglichen Stromflächen extrem groß ist und bis dahin kein Selektionskriterium für relevante Stromflächen in der Literatur existierte. Im Rahmen der Dissertation wird daher das erste *differentialgeometrische Qualitätsmaßes* für Stromflächen eingeführt, das auf Wahrnehmungseigenschaften der Flächen und der in ihnen verlaufenden Strömung basiert [MSR*13a]. Differentialgeometrische Ansätze sind in der Geometrieverarbeitung weit verbreitet, wurden jedoch bis jetzt sehr selten zur Lösung von Visualisierungsproblemen eingesetzt. Für verschiedenste Datensätze kann gezeigt werden, dass dieses Maß deren charakteristischen Stromflächen beschreibt. Zur Optimierung wird auf Grundlage dieses Selektionskriteriums eine globale Diskretisierung des Raumes der möglichen Stromflächen vorgestellt, die durch einen globalen gewichteten Graphen repräsentiert wird. Dadurch können Saatkurven durch simple Pfade in dem globalen Graphen dargestellt werden. Die Diskretisierung des Suchraumes wird von einem neuen Selektionsalgorithmus zur globalen Optimierung der Saatkurve der global optimalen Stromfläche genutzt, der die Lösung dieses NP-schweren Problems dabei durch simulierte Abkühlung approximiert. In Abbildung 4 (b) werden für verschiedene Datensätze automatisch selektierte charakteristische Stromflächen gezeigt. Diese automatisch selektierten Stromflächen sind sehr ähnlich zu von Visualisierungsexperten manuell selektierten Flächen, was die Relevanz der erzielten Ergebnisse bekräftigt.

4 Zusammenfassung

Die vorgestellte Dissertation hat eine Reihe von Beiträgen auf den Gebieten der geometrischen Modellierung und der Strömungsvisualisierung geleistet. Im Kern wird die Beziehung zwischen geometrischen Formen und Vektorfeldern untersucht. Daraus wurden eine Reihe von neuen Ansätzen für offene Probleme beider Disziplinen entwickelt, indem etablierte Konzepte eines Bereiches erfolgreich zur Lösung offener Fragen des anderen Bereiches übertragen werden konnten: Hierzu zählen zum einen der integrations-basierte Ansatz zur Beschreibung kontinuierlicher Deformation verschiedener geometrischer Formen, wobei planare, volumetrische, Oberflächen- und Isoflächen-Deformationen sowie Vektorfeld-basierte Korrekturen von Posen vorgeschlagen wurden. Zum anderen wurden erstmalig etablierter Deformationsverfahren und differentialgeometrische Konzepte zur Flächen-basierten Strömungsvisualisierung angewendet. Dies hat erstmals Poisson-basierte interaktive Explorationen von Strömungen sowie Qualitätsmaße zur automatischen Selektion von Stromflächen ermöglicht. Darüber hinaus wurde mit dem generischen Konzept der Energieregularisierung eine einfache aber mächtige Technik vorgestellt, die erfolgreich zur Verbesserung einer Vielzahl von etablierten Methoden der Modellierung eingesetzt worden ist und auf Grund seiner Universalität auch in anderen Disziplinen anwendbar ist.

Referenzen

[MRT14] **J. Martinez Esturo**, C. Rössl und H. Theisel. „Smoothed Quadratic Energies on Meshes“. In: *ACM Trans. Graph.* (2014), (to appear).

[Mar13] **J. Martinez Esturo**. „Shapes in Vector Fields“. Diss. University of Magdeburg, 2013.

[MRT13] **J. Martinez Esturo**, C. Rössl und H. Theisel. „Generalized Metric Energies for Continuous Shape Deformation“. In: *Springer LNCS (Proc. Curves and Surfaces 2012)* 8177.1 (2013), S. 135–157.

[MSR*13a] **J. Martinez Esturo**, M. Schulze, C. Rössl und H. Theisel. „Global Selection of Stream Surfaces“. In: *Comput. Graph. Forum (Proc. Eurographics)* 32.2 (2013), S. 113–122.

[MSR*13b] **J. Martinez Esturo**, M. Schulze, C. Rössl und H. Theisel. „Poisson-based Tools for Flow Visualization“. In: *Proc. PacificVis*. IEEE, 2013, S. 241–248.

[MRT12] **J. Martinez Esturo**, C. Rössl und H. Theisel. „Continuous Deformations by Isometry Preserving Shape Integration“. In: *Springer LNCS (Proc. Curves and Surfaces 2010)* 6920.1 (2012), S. 456–472.

[FB11] Stefan Fröhlich und Mario Botsch. „Example-Driven Deformations Based on Discrete Shells“. In: *Comput. Graph. Forum* 30.8 (2011), S. 2246–2257.

[MRF*11] **J. Martinez Esturo**, C. Rössl, S. Fröhlich, M. Botsch und H. Theisel. „Pose Correction by Space-Time Integration“. In: *Proc. VMV*. EG, 2011, S. 33–40.

[SBB*11] Justin Solomon, Mirela Ben-Chen, Adrian Butscher und Leonidas Guibas. „As-Killing-As-Possible Vector Fields for Planar Deformation“. In: *Comput. Graph. Forum (Proc. SGP)* 30.5 (2011), S. 1543–1552.

[BKP*10] M. Botsch, L. Kobbelt, M. Pauly, P. Alliez und B. Levy. *Polygon Mesh Processing*. AK Peters, 2010.

[MRT10] **J. Martinez Esturo**, C. Rössl und H. Theisel. „Continuous Deformations of Implicit Surfaces“. In: *Proc. VMV*. EG, 2010, S. 219–226.

[BS08] Mario Botsch und Olga Sorkine. „On Linear Variational Surface Deformation Methods“. In: *IEEE TVCG* 14.1 (2008), S. 213–230.

[LZX*08] Ligang Liu, Lei Zhang, Yin Xu, Craig Gotsman und Steven J. Gortler. „A local/global approach to mesh parameterization“. In: *Comput. Graph. Forum (Proc. SGP)* 27.5 (2008), S. 1495–1504.

[BPG*06] Mario Botsch, Mark Pauly, Markus Gross und Leif Kobbelt. „PriMo: coupled prisms for intuitive surface modeling“. In: *Proc. SGP*. 2006, S. 11–20.

[LPR*02] Bruno Lévy, Sylvain Petitjean, Nicolas Ray und Jérome Maillot. „Least squares conformal maps for automatic texture atlas generation“. In: *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)* 21.3 (2002), S. 362–371.

Janick Martinez Esturo wurde am 29. Juli 1983 in Bünde geboren. Er studierte Informatik an der Universität Bielefeld mit den Schwerpunkten Computergraphik sowie Robotik und erhielt sein Diplom im Jahre 2008. Von 2008 bis 2013 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, an der er seine Promotion im Oktober 2013 erfolgreich abschloss. Seit Juni 2013 forscht er als PostDoc am Max Planck Institut für Informatik in Saarbrücken. Sowohl sein Studium als auch seine Promotion wurden durch Exzellenzstipendien der “Studienstiftung des deutschen Volkes” unterstützt. Seine Forschungsinteressen liegen in den Bereichen der geometrischen Modellierung und geometriebasiert Strömungsvisualisierungen.