

Интегральные Спиновые Изображения в Системах Поиска Трёхмерных Моделей

Александр Крыловецкий, Игорь Черников
Факультет компьютерных наук

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия
aakryl@sc.vsu.ru, ichernikov@yandex.ru

Аннотация

Актуальность задачи поиска трёхмерных моделей обусловлена быстрым ростом популярности и доступности цифровых пространственных изображений в Internet, а так же появлением специализированных баз данных. Данная задача является одной из самых сложных в области компьютерного зрения, поскольку для ее решения требуется эффективный и робастный алгоритм сравнения трёхмерных полигональных моделей произвольной формы. Один из подходов к этому основан на глобальных дескрипторах поверхности, содержащих информацию о форме всей поверхности модели в сжатом и ёмком виде. В данной статье мы представляем новые глобальные дескрипторы поверхности *интегральные спиновые изображения*, которые, по сути, являются расширением известных локальных дескрипторов спиновых изображений. Мы также предлагаем специальный метод нормализации трёхмерной модели для вычисления интегрального спинового изображения. В статье показано, что новый метод сравнения моделей с использованием интегральных спиновых изображений обеспечивает адекватную меру схожести формы моделей и может успешно применяться в системах поиска трёхмерных моделей.

Ключевые слова: Интегральное спиновое изображение, Система поиска, Сравнение 3D моделей, Нормализация 3D моделей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Центральной проблемой, возникающей при поиске в трёхмерных базах данных, является разработка метода сравнения трёхмерных моделей. В общем случае модели имеют разный масштаб, по-разному ориентированы и локализованы в пространстве, что делает невозможным непосредственное сравнение 3D моделей. Поэтому изначально для каждой модели формируется интегральное представление её формы (глобальный дескриптор поверхности). Затем эти дескрипторы сравниваются друг с другом посредством одного из статистических методов (например, коэффициент корреляции). Таким образом, работа системы поиска трёхмерных моделей может быть разбита на два независимых этапа: онлайн и офлайн. На этапе офлайн для всех моделей из базы вычисляются глобальные дескрипторы поверхности. Вычисление дескриптора модели-запроса, сравнение запроса с моделями из базы и формирование ответа системы происходит на этапе онлайн. Схематическое описание системы поиска и пример её работы приведены на Рис. 1.

В настоящей работе мы предлагаем новый метод поиска 3D моделей с использованием интегральных спиновых изображений – глобальных дескрипторов поверхности, основанных на идее известных локальных дескрипторов поверхности спиновых изображений [2, 3]. Для построения

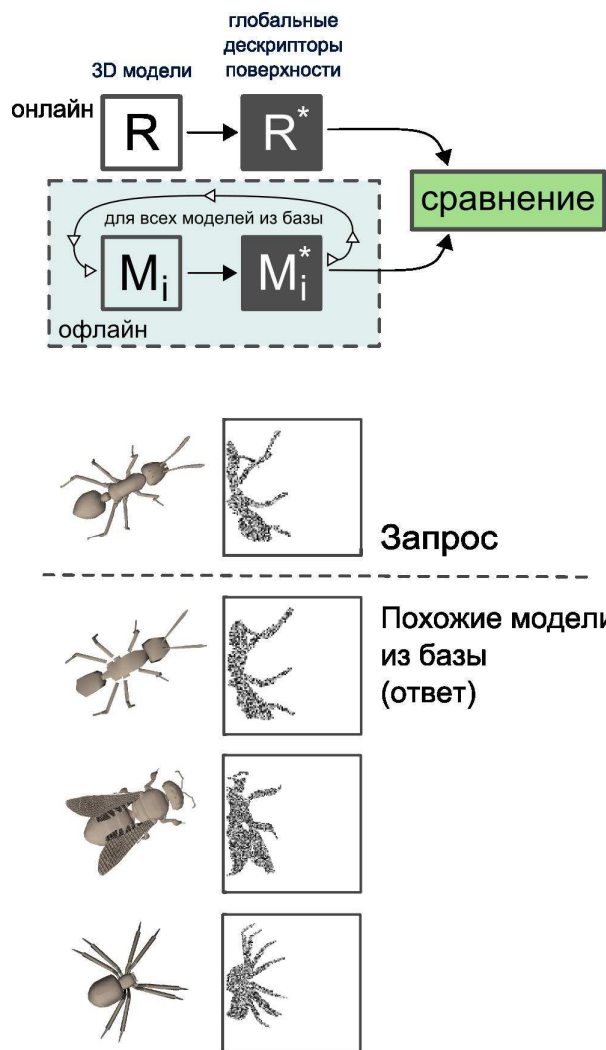


Рис 1: Схема и пример работы системы поиска трёхмерных моделей.

интегральных спиновых изображений необходимо вычислить опорную точку и вектор. Интегральные спиновые изображения также зависят от масштаба модели. Поэтому непосредственному вычислению этих дескрипторов должна предшествовать специальная процедура нормализации модели.

Статья организована следующим образом. В секции 2 мы напомним идею обычных спиновых изображений. Секция 3 содержит определение интегральных спиновых изображений и особенности их вычисления. В секции 4 изложена процедура нормализации 3D модели. Алгоритм сравнения интегральных спиновых изображений представлен в секции 5. Некоторые результаты предложенного метода также находятся в этой секции. Секция 6 заключительная.

2. ОБЫЧНОЕ СПИНОВОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

Спиновое изображение – это локальный дескриптор поверхности, успешно используемый в таких задачах компьютерного зрения, как распознавание объектов и совмещение поверхностей [1, 2, 3]. Спиновое изображение строится относительно одной из точек модели (эту точку называют *опорной*) и описывает форму небольшого участка поверхности модели. Идея спинового изображения заключается в сопоставлении опорной точке цилиндрической системы координат без использования полярного угла. Для каждой точки поверхности модели из окрестности опорной вычисляются относительные цилиндрические координаты α и β (Рис. 2). α и β находятся по следующим формулам

$$\alpha = \sqrt{\|X - P\|^2 - (n \cdot (X - P))^2}, \quad \beta = n \cdot (X - P)$$

Окрестность опорной точки разбивается на так называемые корзины по значениям координат α и β таким образом, что точки с малоотличимыми относительными координатами попадают в одну и ту же корзину. Полученные корзины имеют форму трёхмерных колец (Рис. 3).

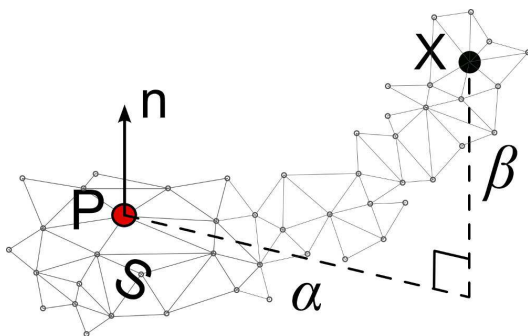


Рис 2: Относительные цилиндрические координаты α и β . P – опорная точка, n – вектор нормали, X – точка модели, S – часть поверхности модели.

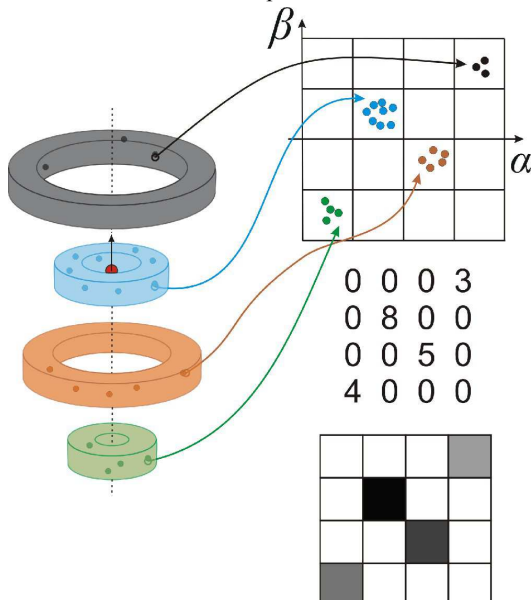


Рис 3: Корзины спинового изображения. Точки с похожими относительными координатами попадают в одну и ту же корзину (трёхмерное кольцо) – элемент двумерной целочисленной матрицы. Графическим представлением спинового изображения является изображение в градациях серого, цвет каждого пикселя которого определяется соответствующим элементом матрицы.

Положение каждой корзины в пространстве задаётся двумя индексами. Спиновое изображение представляет собой двумерную матрицу корзин, элементом которой является количество точек попавших в соответствующую корзину.

Спиновые изображения обладают отличными описательными характеристиками и являются инвариантными преобразованиям вращения и трансляции.

3. ИНТЕГРАЛЬНОЕ СПИНОВОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

На основе идеи спиновых изображений могут быть построены глобальные дескрипторы поверхности. В данном случае мы не должны ограничиваться окрестностью опорной точки, а, наоборот, должны использовать все точки модели (Рис. 4).

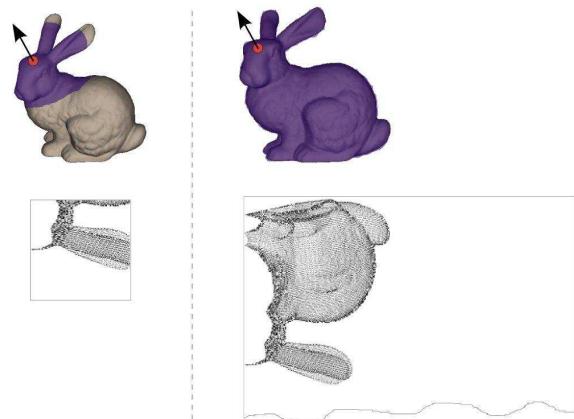


Рис 4: Обычное (слева) и интегральное (справа) спиновое изображение. Первое описывает только часть поверхности модели, второе – форму всей модели.

Для вычисления обычного спинового изображения необходимы координаты опорной точки и вектора нормали к поверхности модели в этой точке. При этом опорной точкой является одна из точек модели. Выбор опорной точки и вектора при построении глобального дескриптора интегрального спинового изображения представляет собой более сложную задачу. Очевидно, что глобальные дескрипторы поверхности, вычисленные для идентичных моделей, должны быть совершенно одинаковые. Это условие является основополагающим при разработке метода сравнения моделей. Вычисление опорной точки и вектора для интегральных спиновых изображений должно быть основано на глобальных характеристиках модели, например, центр масс, главные оси и др. Ещё одна проблема, приводящая к ошибкам сравнения, связана с разным масштабом моделей. Поэтому оптимальное масштабирование моделей должно также предшествовать вычислению интегральных спиновых изображений. Детальное описание процедуры нормализации трёхмерных моделей, включающей масштабирование и вычисление опорной точки и вектора, приведено в следующей секции.

Интегральное спиновое изображение вычисляется аналогично описанной выше схеме для обычного спинового изображения, за исключением того, что используются специфические опорная точка и вектор, и что окрестность опорной точки выбирается таким образом, чтобы абсолютно все точки модели попали в неё. За счёт вычисления относительных координат α и β для всех точек модели, интегральное спиновое изображение описывает форму всей поверхности модели. Преимуществами использования идеи спиновых изображений при построении глобальных дескрипторов поверхности

являются хорошие описательные характеристики, небольшие вычислительные затраты и доступность эффективного и простого алгоритма их сравнения. Метод сравнения трёхмерных моделей описан в секции 5.

4. НОРМАЛИЗАЦИЯ

Нормализация 3D модели для вычисления интегрального спинового изображения включает оптимальное масштабирование и нахождение опорной точки и вектора. Интегральные спиновые изображения нормализованных моделей могут непосредственно сравниваться друг с другом для выявления сходства соответствующих трёхмерных моделей.

Все этапы нормализации могут выполняться независимо друг от друга. Более того, нормализация одной модели происходит без всякого знания обо всех других моделях. Эти обстоятельства позволяют предварительно в режиме офлайн провести нормализацию и вычисление дескрипторов для всех моделей из некоторой базы. Во время запроса останется только обработать одну модель и сравнить её дескриптор поверхности последовательно с дескрипторами всех моделей из базы.

Крайне необходимо, чтобы на этапе нормализации точки всех моделей были одинаковым образом и равномерно распределены вдоль поверхности. Для этого мы используем метод контроля разрешения поверхности, предложенный в [3]. Главным преимуществом этого метода является минимальное изменение формы поверхности в результате её обработки.

4.1 Оптимальное масштабирование

Две модели (два облака точек в трёхмерном пространстве) имеют одинаковый масштаб, если среднее отклонение точек каждой из них равно единице. Это утверждение доказано в [4]. На основании этого можно легко вычислить оптимальный коэффициент масштабирования для произвольного набора точек $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. Для централизованного (центр масс в начале системы координат) набора точек P среднее отклонение находится по формуле

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|p_i\|^2.$$

Оптимальный коэффициент масштабирования вычисляется как

$$s = \frac{1}{\sqrt{D}}.$$

Оптимальное масштабирование модели достигается путём умножения координат всех её точек на коэффициент масштабирования.

4.2 Опорная точка

В случае обычного спинового изображения опорной точкой является одна из точек поверхности модели. Спиновое изображение выстраивается относительно этой точки и описывает форму небольшого участка поверхности (в окрестности опорной точки). Как правило, спиновые изображения вычисляются для всех или для подмножества точек модели. К примеру, для решения задачи совмещения поверхностей спиновые изображения одной поверхности последовательно сравниваются со всеми спиновыми изображениями другой поверхности. Затем определяются лучшие соответствия между точками этих поверхностей. На основе пар соответствующих точек находится наилучшее

преобразование одной поверхности к другой. В системе поиска трёхмерных моделей интегральное спиновое изображение вычисляется один раз для каждой модели в единственной опорной точке. Таким образом, опорная точка для каждой модели должна определяться одинаковым способом. Целесообразно в качестве опорной точки для интегрального спинового изображения выбрать центр масс 3D модели (среднее арифметическое координат всех точек модели). Очевидно, что у похожих моделей центры масс расположены близко друг к другу. И, следовательно, интегральные спиновые изображения, построенные в этих точках с верно выбранными векторами, также похожи. В следующей подсекции представлен метод для определения опорного вектора.

4.3 Опорный вектор

Обычное спиновое изображение строится для точек поверхности в окрестности опорной точки, а вектор нормали к поверхности в опорной точке используется для определения относительных координат. В случае интегрального спинового изображения опорная точка не имеет вектора нормали, так как не лежит на поверхности. Одним из способов определения вектора для интегрального спинового изображения (назовём этот вектор *опорным*) заключается в использовании информации о главных осях модели. Методом для получения такой информации является известный метод главных компонент (Principle Component Analysis – PCA). В данном методе определение главных компонент многомерных данных сводится к вычислению собственных значений и собственных векторов ковариационной матрицы этих данных. В нашем случае данными является модель, представленная облаком точек в трёхмерном пространстве. Элементом ковариационной матрицы C для централизованного облака точек в трёхмерном пространстве $P = \{p_1, \dots, p_n\} \subset R^3$ будет

$$C_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n p_k^{(i)} * p_k^{(j)},$$

где $p_k^{(i)}$ и $p_k^{(j)}$ – i-ая и j-ая координаты точки p_k .

Матрица C является симметричной матрицей размерности три. Её собственные вектора (главные оси) образуют ортогональную тройку векторов и соответствуют распределению точек модели вдоль каждой координаты пространства. Таким образом, похожие модели имеют похожие главные оси. В качестве опорного вектора для построения интегрального спинового изображения удобно выбирать собственный вектор матрицы C , соответствующий наибольшему собственному значению. Такой подход является весьма надёжным и всегда приводит к правильному выбору опорного вектора, за исключением абсолютного равенства собственных значений ковариационной матрицы.

5. СРАВНЕНИЕ

Интегральные спиновые изображения представляют собой двумерные целочисленные матрицы. Так как глобальные дескрипторы содержат информацию о форме всей поверхности модели, сходство дескрипторов означает сходство соответствующих моделей. Наиболее простым и одновременно эффективным методом сравнения таких данных является корреляция. Для сравнения двумерных матриц вполне подходит линейный коэффициент корреляции. Несколько пар моделей из базы Princeton Shape Benchmark [5] с посчитанными коэффициентами

корреляции между их интегральными спиновыми изображениями представлены на Рис. 5.

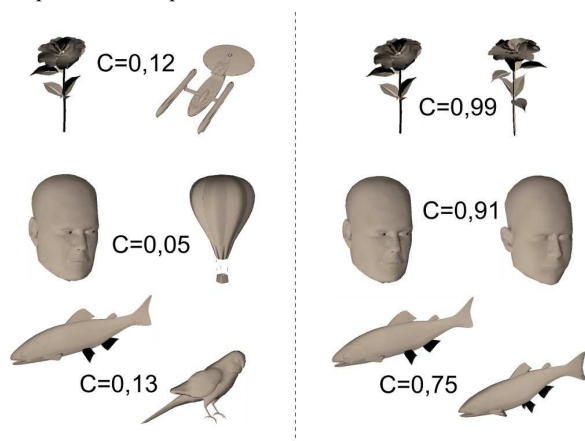


Рис 5: Пары моделей различной формы (слева) и пары моделей похожей формы (справа). C – линейный коэффициент корреляции, вычисленный для интегральных спиновых изображений соответствующих моделей.

Предложенный метод сравнения достаточно хорошо различает трёхмерные модели и позволяет адекватно осуществлять поиск моделей в крупных базах.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные в статье глобальные дескрипторы поверхности интегральные спиновые изображения сохранили все полезные качества своих локальных предшественников и оказались вполне пригодными для интегрального представления формы трёхмерной модели. В силу своей специфики невозможно непосредственно вычислить интегральное спиновое изображение, поэтому необходима процедура нормализации модели. Разработанная процедура обеспечивает эффективную и оптимальную нормализацию 3D моделей. Метод сравнения интегральных спиновых изображений основан на линейном коэффициенте корреляции. Он успешно определяет сходство моделей и выполняется за приемлемое время. В дальнейших исследованиях мы планируем улучшить интегральные спиновые изображения, используя идеи предложенных ранее модификаций спиновых изображений: трёхмерные и ориентированные спиновые изображения [6]. Планируется уделить внимание проблеме индексации баз трёхмерных моделей в целях ускорения работы системы поиска моделей, основанной на интегральных спиновых изображениях, а также вопросу обработки анизотропных моделей. Сравнение предложенных методов с лучшими из известных и апробация на других базах трёхмерных моделей также являются важными направлениями наших исследований.

7. ССЫЛКИ

- [1] Correa, S., Shapiro, L. *A new signature-based method for efficient 3-D object recognition*. Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 1, pp. 769-776, 2001.
- [2] Johnson A.E., Hebert M. *Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes*. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 21(5), pp. 433-449, 1999.

- [3] Johnson A.E. *Spin-Images: A Representation for 3-D Surface Matching*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 1997.
- [4] Kazhdan M. *Shape Representations And Algorithms For 3D Model Retrieval*. PhD thesis, Princeton University, 2004.
- [5] Princeton Shape Benchmark. <http://shape.cs.princeton.edu/benchmark/>
- [6] Крыловецкий А.А., Черников И.С. *Модифицированные спиновые изображения в системах трехмерной реконструкции*. Телематика'2010 : тр. XVII Всерос. науч.-метод. конф. Санкт-Петербург. 21-24 июня 2010 г.

Об авторах

Александр Крыловецкий – доцент кафедры цифровых технологий ВГУ. Его адрес: aakryl@sc.vsu.ru.
Игорь Черников – аспирант кафедры цифровых технологий ВГУ. Его адрес: ichernikov@yandex.ru.