УДК 004.932.2

А.В. Атанов, А.А. Крыловецкий, С.Д. Кургалин

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РЕКОНСТРУКЦИИ ДВУМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ РАДИАЛЬНЫХ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ

Рассматривается задача реконструкции двумерных объектов по точкам. Предложен алгоритм реконструкции на основе классического метода радиальных базисных функций, позволяющий отчасти снять известное ограничение метода радиальных базисных функций на количество точек, по которым строится модель. Разработанный метод позволяет получить корректно реконструированную модель с незначительными ошибками, при этом время, затрачиваемое на реконструкцию, оказывается существенно меньшим, чем время работы классического метода радиальных базисных функций. Алгоритм допускает использование параллельных подсчётов, а также может быть легко применён и для реконструкции трёхмерных объектов при минимальной модификации.

Радиальные базисные функции; компьютерное зрение; реконструкция поверхностей; параллельные вычисления.

A.V. Atanov, A.A. Krylovetsky, S.D. Kurgalin

A PARALLEL ALGORITHM FOR 2D-RECONSTRUCTION BASED ON RADIAL BASIS FUNCTIONS

This paper deals with the problem of 2D reconstruction from unordered point clouds. We introduce a new reconstruction algorithm based on classical radial basis functions method to partly overcome the limitation of the RBF method on the number of points used for reconstruction. The experimental results show that our algorithm can reconstruct 2D models adequately with small errors; moreover, it reconstructs models much faster than normal radial basis functions method using all the points for creating the final surface. Our algorithm allows parallel implementation and can be used for 3D reconstructions with only slight changes.

Radial basis functions; computer vision; surface reconstruction; parallel computing

Введение. Проблема создания реалистичных моделей различных объектов – важнейшее направление в компьютерном зрении. Потребность в подобных моделях возникает в различных областях: медицине, геологии, индустрии компьютерных игр, робототехнике и т.д. Одним из основных способов создания таких моделей является реконструкция по точкам, полученным, например, с помощью специальных сканеров. Под реконструкцией здесь понимается построение физически корректной модели объекта и её представление в форме, удобной для хранения, изменения и визуализации.

Среди разнообразных методов реконструкции [1] в последние годы большое распространение получили методы, использующие неявно заданные функции. В частности, одним из базовых алгоритмов реконструкции является метод радиальных базисных функций [2], [3], который, однако, имеет существенный недостаток – ограничение на количество точек, по которым производится реконструкция.

Целью нашего исследования является создание на базе классического метода радиальных базисных функций алгоритма, который позволил бы проводить реконструкцию объектов вне зависимости от количества исходных точек за приемлемое время.

Теоретическая часть. В общем виде задача реконструкции может быть сформулирована следующим образом: по заданному набору точек $Q = \{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^{n}$, лежащих на поверхности $M \subset \mathbb{R}^3$, построить поверхность M', которая была бы корректной аппроксимацией для M.

Метод радиальных базисных функций (РБФ) основан на использовании неявно заданных функций, т.е. для построения искомой аппроксимации необходимо найти функцию f, которая неявно определяет поверхность M' и удовлетворяет уравнению

$$f(x_i, y_i, z_i) = 0,\ i = 1, \dots, n. \tag{1}$$

Для того чтобы избежать тривиального решения данного уравнения (т.е. $f \equiv 0$), в исходное множество точек Q следует добавить некоторое число дополнительных точек, не лежащих на нулевой поверхности уровня, т.е. $f(x_i, y_i, z_i) = d_i \neq 0$ $(i = n+1, \dots, N)$. Очевидным выбором для f в данном случае будет функция расстояния со знаком (о способах построения таких функций [4]).

Таким образом, имея множество точек $X = \{x_i\}_{i=1}^{N} \subset \mathbb{R}^3$ и множество соответствующих значений функции $\{f_i\}_{i=1}^{N} \subset \mathbb{R}$, построим интерполирующую функцию $s(x)$ такую, что

$$s(x_i) = f_i,\ i = 1, \dots, N. \tag{2}$$

В задачах реконструкции в качестве интерполирующей функции удобно использовать различные радиальные базисные функции, которые в общем виде можно представить как

$$s(x) = p(x) + \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \varphi(|x - x_i|). \tag{3}$$

Здесь $p(x)$ – полином малой степени, λ_i – весовые коэффициенты, φ – базисная функция; точки x_i называют центрами радиальной базисной функции. В зависимости от моделируемого объекта могут использоваться различные базисные функции: $\varphi(r) = r^2 \log(r)$, $\varphi(r) = r$, $\varphi(r) = r^3$ и др.

Как показано в [3], на коэффициенты в равенстве (3) накладываются дополнительные ограничения, которые вместе с равенством (2) позволяют составить систему линейных уравнений, решая которую можно найти коэффициенты полинома $p(x)$ и веса λ_i, тем самым полностью определив $s(x)$.

Однако известно, что при количестве точек в $Q \gtrsim 2000$ решение подобной системы будет содержать большое количество ошибок и применение его в подобном случае невозможно. Были разработаны модификации метода РБФ [3], [5], позволяющие осуществлять реконструкцию по неограниченному числу точек, однако эти методы лишены простоты классического метода.

В нашей работе предлагается метод, который позволяет отчасти снять ограничение на количество исходных точек во множестве Q, при этом используется лишь классический метод радиальных базисных функций. Более того, в данном случае появляется возможность легко использовать параллельные алгоритмы для ускорения подсчётов. Алгоритм метода состоит из следующих шагов:

1. Множество Q разбивается на l подмножеств $Q_1, Q_2, \dots, Q_l$, причём точки из множества Q выбираются по равномерному закону распределения.
2. Для каждого из множеств $Q_1, Q_2, \dots, Q_l$ строится своя РБФ, в итоге создаются l промежуточных поверхностей.
3. Если данная точка была классифицирована как внутренняя (внешняя) для более чем половины из l построенных поверхностей, то она будет внутренней (внешней) и для итоговой поверхности. Таким образом, будет получена поверхность, формально построенная по всем исходным точкам из множества Q.

Реализационная часть. Для проверки разработанный метод был применён к реконструкции двумерных объектов. В качестве эталона была выбрана фигура, образуемая кривой, неявно заданной функцией $(x/3-4)^2 + ((y/3-4)^2 - 6)^3 - (x/3-4)^3(y/3-4)^3 = -5$.

На этой кривой были выбраны 1035 точек, по которым и проводилась реконструкция. Множество точек было разбито на 10 подмножеств, для каждого из которого была построена РБФ, после чего, согласно описанному выше алгоритму, принималось решение, принадлежит ли данная точка сетки внутренней области фигуры или находится вне её. Данные по ошибочно классифицированным точкам для двух основных типов базисных функций представлены в таблице.

Таблица 1

Ошибочно классифицированные точки для двух различных базисных функций при использовании классического и параллельного методов (вычисления проводились на сетке 25x25 с шагом h = 0,1)

Вид базисной функции	Число неверно классифицированных точек	
	Классический алгоритм	Параллельный алгоритм
$\varphi(r) = r$	318 (1,86 %)	65 (0,38 %)
$\varphi(r) = r^3$	8 (0,05 %)	17 (0,1 %)

Как видно, уже в случае простейшей базисной функции $\varphi(r) = r$ классический алгоритм, в отличие от параллельного, показывает неудовлетворительные результаты. При этом работа нашего алгоритма может быть существенно ускорена при использовании параллельных вычислений – максимально возможное количество параллельных процессов здесь равно числу разбиения l исходного множества на подмножества.

Заключение. Был разработан метод реконструкции моделей объектов по точкам на основе метода РБФ. Данный метод позволяет в определённой степени снять ограничение на количество точек, используемых для реконструкции, при этом сохраняя простоту классического метода РБФ. Помимо этого, очевидно, метод легко удаляет шум, который неизбежен в исходных данных (ошибочная точка, вошедшая в одну из промежуточных поверхностей, не может остаться в итоговой поверхности). По построению метод является параллельным, т.е. имеется возможность увеличить скорость реконструкции.

Главным недостатком метода является то, что если реконструируемый объект содержит много мелких деталей, итоговая модель может оказаться довольно грубой. Дальнейшая работа предполагает решение данной проблемы, например, за счёт комбинирования метода РБФ с методом функций уровня (см.[4]), когда построенная грубая модель будет улучшаться с использованием последнего метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Paragios N., Chen Y., Faugeras O.D.* Handbook of Mathematical Models in Computer Vision. Springer, 2006. – P. 639.
2. *Buhmann M.* Radial Basis Functions: Theory and Implementations. – Cambridge University Press, 2003. – P. 259.
3. *Carr J., Beatson R.* Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions // ACM SIGGRAPH. – 2001. – P. 67-76.
4. *Osher S., Fedkiw R.P.* Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces. Springer, 2002. – P. 296.
5. *Turk G., O'Brien J.F.* Variational Implicit Surfaces // Tech Report GIT-GVU-99-15. – Georgia Institute of Technology, 1999. – 9 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.ф.-м.н. И.В. Илларионов.

Атанов Артем Викторович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Воронежский государственный университет"; e-mail: aatanov@mail.ru; 394006, г. Воронеж, Университетская пл., 1; тел.: 84732208755 кафедра цифровых технологий факультета компьютерных наук; аспирант.

Крыловецкий Александр Абрамович – e-mail: aakryl@cs.vsu.ru; кафедра цифровых технологий факультета компьютерных наук; зам. декана факультета компьютерных наук; к.ф.-м.н, доцент.

Кургалин Сергей Дмитриевич – e-mail: kurgalin@bk.ru; кафедра цифровых технологий факультета компьютерных наук; заведующий кафедрой цифровых технологий факультета компьютерных наук, директор Института повышения квалификации ВГУ; д.ф.-м.н.; профессор.

Atanov Artiom Viktorovich – Voronezh State University; e-mail: aatanov@mail.ru; Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394006, Russia; phone: +74732208755; the department of digital technologies faculty of computer science; postgraduate student.

Krylovetsky Alexander Abramovich – e-mail: aakryl@cs.vsu.ru; the department of digital technologies faculty of computer science; vice dean of computer science faculty; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

Kurgalin Sergey Dmitrievich – e-mail: kurgalin@bk.ru; the department of digital technologies, faculty of computer science; head of digital technologies department; director of professional development Institute of VSU; dr. of phis.-math. sc.; professor.