

УДК 514.74

С.А. Бутенков

Таганрогский государственный радиотехнический университет, Россия

Анализ изображений в параллельных системах с помощью R-гистограмм для обобщенных геометрических моделей

В работе рассматриваются методы качественного оценивания пространственных отношений между двумерными объектами, связанные с вычислением гистограмм углов, применяемых для получения оценок взаимного положения объектов. Предлагается практически удобное представление объектов с помощью специального класса функций (R-функций и обобщенных геометрических моделей), что позволяет применить непроцедурные вычислительные методы для решения основных задач компьютерного зрения. В работе вводится определение гистограмм на R-функциях. Это понятие обобщает понятие силовых гистограмм и позволяет создать методы эффективной обработки визуальной информации на параллельных вычислительных системах.

Введение

Одним из привлекательных общих подходов к построению параллельных систем обработки геометрической информации является непроцедурный подход, развиваемый в работах А.С. Нариньяни и его школы. Он основывается на использовании типовых потоковых алгоритмов, допускающих эффективное распараллеливание, при этом все детали описания включаются в модель [1].

В ряде работ введено понятие обобщенной геометрической модели (ОГМ), развивающей методики В.Л. Рвачева [2] и его последователей [3]. ОГМ позволяют применить непроцедурный подход в задачах моделирования геометрической информации [4] и, в частности, в задачах машинного зрения [5], [6].

Применение ОГМ отличается тем, что одни и те же модели могут использоваться для решения широчайшего круга задач – распознавание, анализ сцен, планирование движения, визуализация, оптимизация и т.д. Теория R-моделей и развивающих их ОГМ достигла определенного уровня совершенства [2], однако разработка эффективных алгоритмов решения задач на ОГМ всегда будет актуальной.

В настоящей работе делается попытка применения ОГМ для решения задач, связанных с моделированием неопределенных объектов (vague objects), т.е. таких, которые не могут быть точно описаны известными методами. Примеры подобных объектов можно найти в области ГИС, где объектами являются горы, озера, реки и т.п., чья форма не может быть описана уравнениями, более того, они могут описываться фракталами [7].

Для подобных объектов понятия взаимного расстояния, взаимного положения, мер сходства и т.п. становятся весьма далекими от традиционно принятых в машинном зрении [8]. Поэтому в работе предпринимается попытка унификации этих проблем на базе ОГМ и разработки соответствующих алгоритмов.

Обобщенные геометрические модели и их свойства

В основе математического аппарата ОГМ лежат R -функции [2], в которых вводятся параметры, позволяющие в соответствии с идеологией обобщенных вычислительных моделей (ОВМ) Нариньяни [8] описывать объекты с изменяющейся формой. ОГМ включают в себя модель внешнего мира, в которую входят группы преобразований локальных координат объекта, положение источников освещения и, возможно, время. Для подобных моделей возможно решение как прямых задач – визуализация, оптимизация, так и обратных задач – анализ трехмерного объекта по его изображению, планирование движения и т.д.

Математическим представлением ОГМ является уравнение относительно функции N переменных ($N \gg 1$),

$$\omega(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) = 0, \quad (1)$$

где \bar{x} – вектор координат точек изображения, $\bar{\alpha}$ – вектор собственных параметров объекта (может включать нечисловые значения), $\bar{\beta}$ – вектор параметров мира вокруг модели. Подстановка конкретной тройки векторов значений $\{\bar{x}_d, \bar{\alpha}_d, \bar{\beta}_d\}$ в уравнение модели дает некоторую меру близости данной точки к внешней стороне объекта. Это дает возможность сводить все операции над ОГМ к поиску областей знакопостоянства функции модели (1).

В работах [4], [5] была предложена мера сходства, основанная на фундаментальном свойстве постоянства знака R -функций в заданных областях [6]. Для подобных моделей процесс распознавания сводится к минимизации суммарной невязки между изображениями модели эталонного объекта и точками предъявленного изображения при изменении параметров модели в области их допустимых значений: $\varepsilon = \min_{x_d \in X, \alpha_d \in A, \beta_d \in B} \sum \omega(\bar{x}_d, \bar{\alpha}_d, \bar{\beta}_d)$. На основании этой меры возможно построение процедур распознавания без обучения.

Ниже приводится пример построения ОГМ на плоскости и операций над ней. Модель проектируется из предикатов, имеющих постоянный знак в заданных областях плоскости:

$$\begin{aligned} \Omega_1(x, y) &= a^2 - (x - w)^2, \quad \Omega_2(x, y) = b^2 - (x - c)^2, \quad \Omega_3(x, y) = d^2 - (y - e)^2, \\ \Omega_4(x, y) &= g^2 - (y - i)^2, \quad \Omega_5(x, y) = j^2 - (x - k)^2 - (y - l)^2, \\ \Omega_6(x, y) &= n^2 - (x - p)^2 - (y - r)^2, \quad \Omega_8(x, y) = s^2 - (x - t)^2, \\ \Omega_7(x, y) &= x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta) - \rho, \quad \Omega_9(x, y) = u^2 - (x - q)^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь x и y – координаты на плоскости, а переменные $a - q$ – параметры ОГМ, полностью определяющие ее форму [4]. К полученным предикатам применяются R -операции [2], например, для заданного $\alpha = 1$:

$$x \wedge_1 y = \frac{x + y - |x - y|}{2} = \min(x, y), \quad x \vee_1 y = \frac{x + y + |x - y|}{2} = \max(x, y), \quad \bar{x} = -x. \quad (3)$$

В результате мы можем записать уравнение модели (1) в виде:

$$\omega^1 = (((\Omega_1 \wedge_1 \Omega_3) \wedge_1 (\Omega_2 \wedge_1 \Omega_4)) \wedge_1 \Omega_5) \vee_1 \Omega_6 \wedge_1 (\neg(\Omega_8 \wedge_1 \Omega_9)). \quad (4)$$

R -операции в (4) успешно реализуются в вычислительных системах, особенно при объектно-ориентированной реализации [9].

Рис. 1 иллюстрирует результаты непроцедурной визуализации ОГМ для заданного вектора параметров. Рис. 1 показывает поверхности уровня, задаваемые с помощью фиксированных значений высот $\omega_i = h_i, i = 1, \dots, n$.

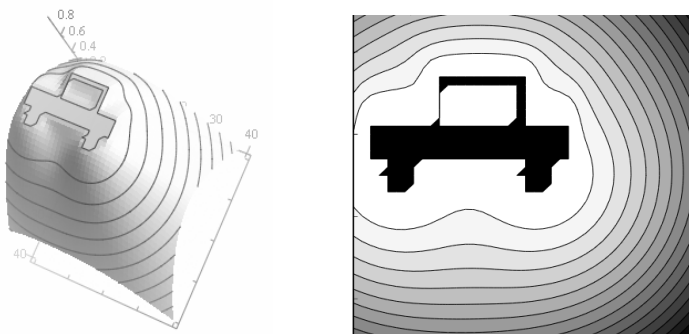


Рисунок 1 – Иллюстративный пример построения линий уровня ОГМ автомобиля

Отметим, что указанный непроцедурный способ визуализации является максимально распараллеливаемым, так как вычисления (4) в каждой точке не связаны с данными в других точках [10], [11].

Непроцедурные преобразования ОГМ

Важным качеством ОГМ является возможность их аналитической обработки. Преобразование модели осуществляется на уравнениях (1). Методы решения типовых задач описаны в [4]. В качестве примера непроцедурного преобразования приведем получение сечений модели (4) прямыми Ω_7 из (2). Для этого достаточно записать следующее преобразование функции модели ω^1 [4]:

$$\omega^2 = -(\Omega_7)^2 \wedge_{\alpha} \omega^1. \quad (5)$$

Результат визуализации (5) представлен на рис. 2 (слева – исходная модель, справа – сечение модели прямой).

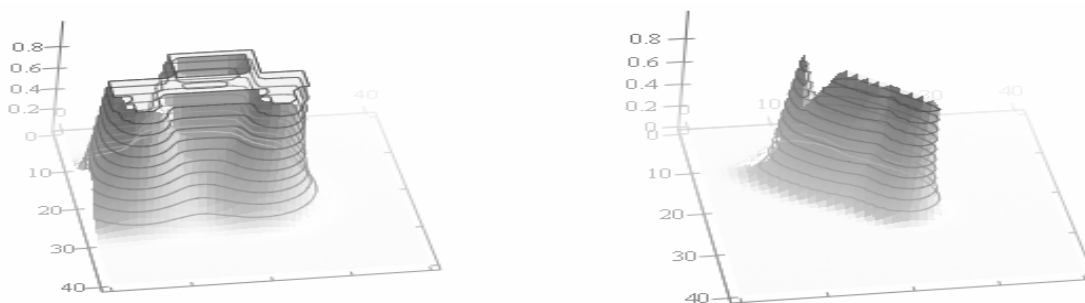


Рисунок 2 – Иллюстративный пример преобразования ОГМ (сечение объекта прямой)

Указанное свойство ОГМ позволяет строить на их основе непроцедурные системы распознавания и локализации изображений объектов и анализа сцен.

Геометрические отношения между точечными объектами

Метод представления геометрических отношений между объектами является одной из фундаментальных проблем в разработке алгоритмов обработки геометрической информации. На плоскости чаще всего используются бинарные отношения типа $Ad_e B$ или « B находится на расстоянии d от A » и $Ar_\theta B$ или « B находится в направлении θ относительно A », где A – ссылочный объект, а B – изучаемый объект. Часто в качестве ссылочного объекта используется начало координат. Для точечных объектов эти отношения легко выразить в количественной форме, вычисляя какую-либо метрику, например евклидову $d_e(A, B) = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$, или решая систему уравнений относительно угла θ (значение p в данном случае не несет полезной информации):

$$\begin{cases} x_A \cos(\theta) + y_A \sin(\theta) - p = 0 \\ x_B \cos(\theta) + y_B \sin(\theta) - p = 0 \end{cases}$$

где $p \in (0, \infty]$, $\theta \in (0, 2\pi]$. Здесь параметры θ и p характеризуют некоторую прямую $\Delta_\theta(p)$ или определяемое с ее помощью направление.

В ряде работ предлагаются более общие подходы к описанию отношений, применимые к неточечным объектам.

Топологические отношения между двумерными объектами

Для неточечных объектов чаще всего возможно лишь лингвистическое шкалирование этих геометрических отношений [12]. Для пересекающихся объектов вводится отношение взаимного положения на базе топологии подмножеств [13]. Для этого необходимо задать характеристическую функцию объекта E и обратную к ней в виде

$$f_E(x, y) = \begin{cases} 0, \forall (x, y) \notin E \\ 1, \forall (x, y) \in E \end{cases}, \quad f_E^{-1}(x, y) = \begin{cases} 1, \forall (x, y) \notin E \\ 0, \forall (x, y) \in E \end{cases}. \quad (6)$$

Введение подобной функции определяет внутреннюю и внешнюю части объекта A , при этом не требуется выполнения условия смежности точек данных. Обратная функция $f^{-1}(x, y)$ определяет дополнение $\neg A$ для объекта A . Для двух объектов A и B имеется, в общем случае, четыре базовых множества, определяющихся заданными объектами: $A \cap B$, $\neg A \cap B$, $A \cap \neg B$, $\neg A \cap \neg B$. Остальные множества могут быть получены из базовых:

$$\begin{aligned} A &= (A \cap B) \cup (A \cap \neg B), \\ B &= (A \cap B) \cup (\neg A \cap B), \\ A \cup B &= (A \cap B) \cup (\neg A \cap B) \cup A \cap \neg B. \end{aligned} \quad (7)$$

На основании (7) можно ввести меры базовых множеств:

$$\mu_{11} = |A \cap B| = \iint_{x,y} f_A(x,y) f_B(x,y) dx dy, \quad \mu_{12} = |A \cap \neg B| = \iint_{x,y} f_A(x,y) f_B^{-1}(x,y) dx dy,$$

$$\mu_{21} = |\neg A \cap B| = \iint_{x,y} f_A^{-1}(x,y) f_B(x,y) dx dy,$$

$$\mu_{22} = |\neg A \cap \neg B| = \iint_{x,y} f_A^{-1}(x,y) f_B^{-1}(x,y) dx dy.$$

В [13] показано, что топологические отношения положения описываются множеством {НЕ ПЕРЕСЕКАЕТСЯ, ПЕРЕКРЫВАЕТСЯ, СОДЕРЖИТ, СОДЕРЖИТСЯ, СОВПАДАЕТ}.

Введенные топологические отношения использовались в [13] как для качественного описания расположения объектов, так и для построения на их основе мер близости объектов.

Геометрические отношения между двухмерными объектами

Введем топологическое определение представления объектов на плоскости с помощью отрезков прямых [14].

Определение 1. Регулярным объектом E назовем непустое топологически замкнутое множество точек ($\overset{\circ}{E} = E$), которое для всех вещественных θ и p представляет собой объединение $E \cup \Delta_\theta(p)$ конечного числа взаимно отдельных отрезков. Множество $E \cap \Delta_\theta(p)$ назовем продольным сечением объекта E . На рис. 3 сечения изображены жирными линиями.

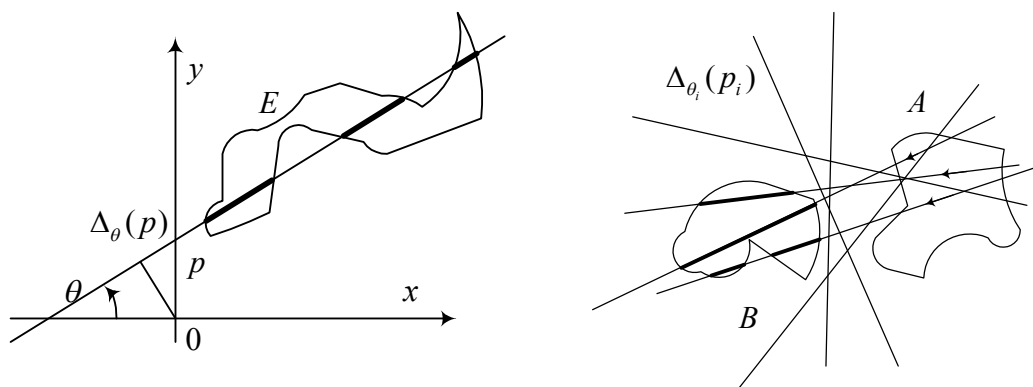


Рисунок 3 – Продольные сечения и их применение для топологического представления регулярных объектов

Любой регулярный объект B может быть представлен как объединение множества продольных сечений, а взаимное положение объектов может представляться сечениями каждого объекта прямыми линиями $\Delta_\theta(p)$ относительно ссылочного объекта A . Обращение сечения в 0 означает отсутствие объектов в выбранном направлении.

F-гистограммы на регулярных объектах

Следующим шагом к построению пространственных отношений на регулярных объектах является введение силовой функции, связанной с сечениями объектов. В [14] вводится силовая функция $\phi_{\theta,p}$, которая вычисляется на сечениях регулярного объекта (рис. 3) с помощью криволинейного интеграла. Для совместного сечения объектов A и B , представленных характеристическими функциями f_A и f_B , можно записать:

$$\begin{aligned} \phi_{\theta,p}(A_\theta(p), B_\theta(p)) = & \int_{\Delta_\theta(p)} f_A(p \cos(\theta) - s \sin(\theta), p \sin(\theta) - s \cos(\theta)) ds + \\ & + \int_{\Delta_\theta(p)} f_B(p \cos(\theta) - s \sin(\theta), p \sin(\theta) - s \cos(\theta)) ds. \end{aligned} \quad (8)$$

Согласно [14] силовая гистограмма (F -гистограмма) с учетом (8) вычисляется по всем совместным сечениям пары объектов A и B при регулярном изменении $\theta_i \in (0, 2\pi]$:

$$F_r^{AB}(\theta, A_\theta(p), B_\theta(p)) = \sum_{i \in 1..n} \phi_{\theta,p}(A_\theta(p), B_\theta(p)).$$

Расшифровка гистограммы состоит в определении максимума силовой функции относительно номера квадранта. В [14] показано, что для описания положения непересекающихся объектов на изображении достаточно ввести множество вида {СЛЕВА, СВЕРХУ, СПРАВА, НИЖЕ, ОКРУЖАЕТ}. Введенные оценки были использованы авторами для решения широкого круга задач описания сцен по их двумерным изображениям, в задачах ГИС и т.п. [15].

R-гистограммы на обобщенных геометрических моделях

В предыдущих разделах интегральные преобразования были использованы для описания взаимного положения регулярных объектов на плоскости. Можно отметить, что формулы (8) и (9) являются частными случаями преобразования Радона [16]. Однако в силу неопределенности класса объектов, используемых в этих формулах, в них использовались произвольные характеристические функции (6), что не позволяет обобщить полученные результаты на все случаи взаимного положения отрезков.

К числу основных особенностей R -функций, входящих в состав ОГМ, относится свойство их регулярности в смысле определения 1.

Теорема 1. ОГМ, построенные из регулярных элементов с помощью R -функций системы R_α [2], являются топологически регулярными объектами.

Доказательство. Основным свойством R -функций является постоянство знака в областях, принадлежащих внутренней и внешней частям объекта: $\forall \bar{x} \in E : \omega(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) > 0$, $\forall \bar{x} \in \overset{\circ}{E} : \omega(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) < 0$ [2]. На границах объекта выпол-

няется условие (1). Доопределяя (1) до $\forall \bar{x} \in E : \omega(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) \geq 0$, мы можем записать $\overset{\circ}{E} = -E$, что является аналитическим выражением условия замыкания объекта E .

Еще одной важной особенностью ОГМ, построенных на R -функциях, является возможность аналитического преобразования моделей в целях получения аналогов интегральных формул для вычисления отношений. Нормируя уравнение модели, мы можем получить аналитическое представление характеристических функций (6) с помощью уравнений моделей (1) в виде

$$\omega_E(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) = \frac{1}{1 + |\omega(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta})|}, \quad \omega_E^{-1}(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) = 1 - \omega_E(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}). \quad (9)$$

Фиксируя значения векторов параметров $\bar{\alpha}$ и $\bar{\beta}$, мы можем применять формулы (7) к обобщенным моделям:

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= |A \cap B| = \iint_{x,y} \omega_A(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) \omega_B(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) d\bar{x}, \\ \mu_{12} &= |A \cap \neg B| = \iint_{x,y} \omega_A(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) (1 - \omega_B(\bar{x}, \bar{\alpha}, \bar{\beta})) d\bar{x} \end{aligned}$$

и т.д. На основании вычисленных значений мер определяется взаимное положение моделей объектов [13].

Благодаря тому, что ОГМ описываются уравнениями, мы можем получить формулы для вычисления сечений ОГМ произвольными объектами [4], в том числе и прямыми $\Delta_\theta(p)$. Пример аналитического представления сечения модели прямой $\Delta_\theta(p)$ приведен на рис. 2.

По аналогии с (5) и (8) запишем силовую функцию для регулярных объектов A и B , представленных своими ОГМ, в аналитическом виде:

$$\phi_{\theta,p}(A, B) = \int_{\Delta_\theta(p)} (-(\Omega_7)^2) \wedge_\alpha (\omega^A \wedge_\alpha \omega^B) ds. \quad (10)$$

На основании (9) и (10) уравнение для построения силовой гистограммы на ОГМ объектов (R -гистограммы) можно записать в виде, приведенном к координатной форме:

$$F_R^{AB}(\theta, A_\theta(p), B_\theta(p)) = \iint_{x,y} (-(\Omega_7)^2) \wedge_\alpha (\omega^A \wedge_\alpha \omega^B) dx dy, \quad (11)$$

так как при замене дифференциала ds мы получаем $\sqrt{\sin(\theta)^2 + \cos(\theta)^2} = 1$.

Введенные формулы позволяют строить отношения взаимного положения для произвольных объектов, поскольку в силу теоремы 1 они будут справедливы для любых ОГМ, построенных с помощью системы функций R_α . Свойства получаемых R -гистограмм аналогичны свойствам F -гистограмм по [14].

В случае, когда один из объектов представлен в виде дискретного изображения, другой – в виде ОГМ, нет необходимости в преобразовании ОГМ к дискретному представлению на плоскости, например, путем построения дистантного изображения [10]. Введенные отношения позволяют строить R -гистограммы для случая, когда представление объектов A и B различно.

В этом случае вместо (11) следует использовать

$$F_R^{AB}(\theta, A_\theta(p), B_\sigma(p)) = \sum_{i \in 1..n} \sum_{j \in 1..m} f^A(x_i, y_j) \cdot (-\Omega_7(\theta, x_i, y_j))^2 \wedge_\alpha \omega^B(x_i, y_j) . \quad (12)$$

Выражение (12) допускает максимально возможное распараллеливание, так как согласно свойствам R -функций [2] значения в каждой точке (x_i, y_j) вычисляются независимо.

Заключение

Полученные в работе методы вычисления пространственных отношений для геометрических объектов позволяют разрабатывать универсальное программное обеспечение для непроцедурного решения задач обработки геометрической информации и машинного зрения.

Рис. 4 демонстрирует применение программного обеспечения непроцедурной обработки ОГМ (1) для построения и визуализации модели абстрактного объекта «автомобиль типа «седан»». ОГМ включает параметры, определяющие форму, размеры, окраску, освещение, положение в пространстве и закон движения объекта. Получаемое в результате визуализации изображение (слева) включается в естественную сцену (справа) с учетом положения и движения.

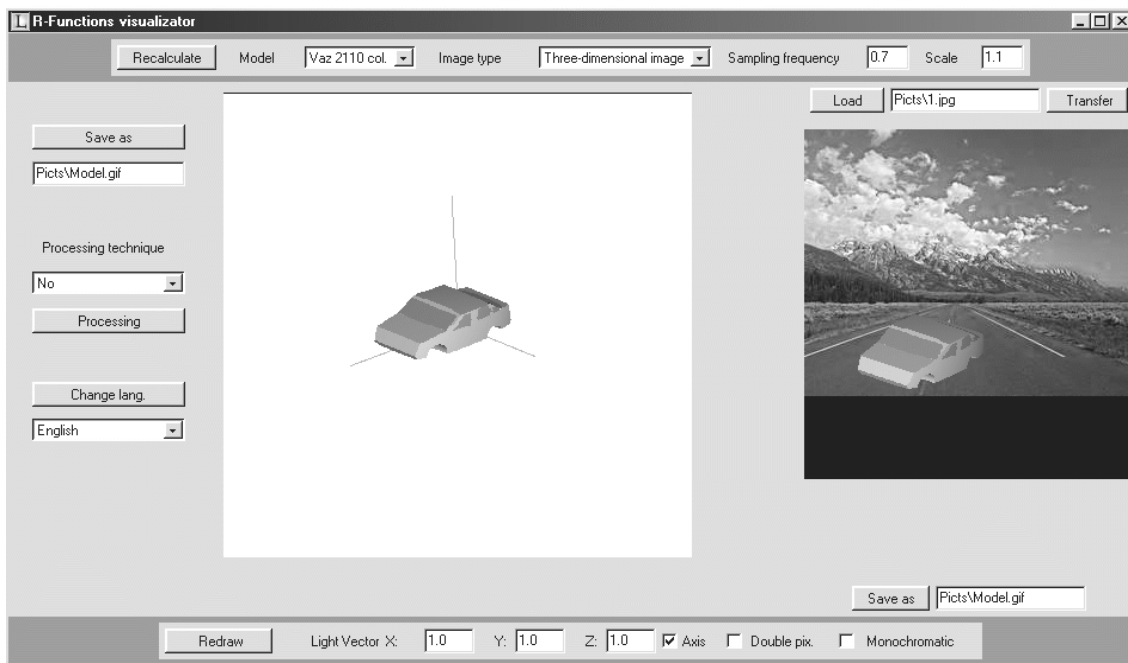


Рисунок 4 – Применение ОГМ для построения изображений сцен, включающих естественные и искусственные объекты

Характерной особенностью разработанного программного обеспечения является то, что для выполнения всех указанных операций используется одна и та же модель и одни и те же модули непроцедурной обработки графической информации.

На основании полученных методов могут строиться алгоритмы обработки, не связанные с особенностями конкретных платформ.

Литература

1. Нариньяни А.С. Модель или алгоритм: новая парадигма информационной технологии // Информационные технологии. – 1997. – № 4.
2. Рвачев В.Л. Теория R -функций и некоторые ее приложения. – К.: Наук. думка, 1982.
3. Куценко Л.Н. Машинная графика в задачах проекционной природы. – М.: Знание, 1990.
4. Бутенков С.А., Семерий О.С. Аналитический подход к решению задач компьютерной графики // Искусственный интеллект. – 2000. – № 3. – С. 428-437.
5. Бутенков С.А., Семерий О.С. Оптимизационный метод распознавания изображений с помощью аналитических моделей в параллельных системах // Труды междунар. конф. «ИМС-99». – Таганрог: ТРТУ. – 1999. – С. 190-196.
6. Бутенков С.А., Кривша В.В. Применение обобщенных геометрических моделей в машинном зрении // Труды междунар. науч.-техн. конф. «IEEE AIS'02». – Москва: Физматлит. – 2002.
7. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991.
8. Нариньяни А.С. Недоопределенность в системах представления и обработки знаний // Изв. АН СССР. Сер. «Техн. кибернетика». – 1986. – № 5. – С. 3-28.
9. Бутенков С.А., Горбань А.С. Повышение вычислительной эффективности обобщенных аналитических моделей геометрических объектов // Труды III Всерос. науч.-техн. конф. «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (ИАМП-2002). – Бийск. – 2002. – С. 52-57.
10. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976.
11. Pyt'ev Yu.P. Morphological Image Analysis // Pattern Recognition and Image Analysis. – 1993. – Vol. 3, № 1. – P. 19-28.
12. Erwig M., Schneider M. Vague Regions // 5th International Symp. on Advances in Spatial Databases (SSD), LNCS 1262. – 1997. – P. 298-320.
13. Winter S. Location-Based Similarity Measures of Regions // Ed. by D. Fritch. ISPS Comission IV Symposium «GIS – between Vision and Applications». – Stuttgart (Germany). – 1999. – P. 669-676.
14. Keller J., Matsakis P. Aspects of High Level Computer Vision Using Fuzzy Sets // FUZZ-IEEE. – Seoul (Korea). – 1999. – P. 847-852.
15. Matsakis P., Laurent W. A New Way to Represent the Relative Position between Aerial Objects // IEEE Trans. On «Pattern Analysis and Machine Intelligence». – 1999. – Vol. 21, №7. – P. 367-375.
16. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. – М.: Мир, 1990.

The qualitative evaluation of directional spatial relationships between areal objects often relies on the computation of a histogram of angles or forces which is considered to obtain a good estimations of the relative position of an object with regard to another. More conventional representation for the objects are the special functions (R -functions and Common Geometry Models), that provide the non-procedure computation for the all problems in computer vision. In this paper the notion of the histogram of R -functions is introduced. It generalizes the histogram of forces and provides the rapid processing for different kinds of data in the parallel computers.

У роботі розглядаються методи якісного оцінювання просторових відносин між двовимірними об'єктами, пов'язані з обчисленням гістограм кутів, застосовуваних для отримання оцінок взаємного положення об'єктів. Пропонується практично зручне представлення об'єктів за допомогою спеціального класу функцій (R -функцій і узагальнених геометричних моделей), що дозволяє застосувати непроцедурні обчислювальні методи для рішення основних задач комп'ютерного зору. У роботі вводиться визначення гістограм на R -функціях. Це поняття узагальнює поняття силових гістограм і дозволяє створити методи ефективної обробки візуальної інформації на паралельних обчислювальних системах.

Статья поступила в редакцию 14.08.03.