

12. *Bershtein L.S., Bozhenyuk A.V., Rozenberg I.N.* Decision Making on the Basis of Monotonic Expert Information // 6th European Congress on Intelligent Techniques & Soft Computing. Aachen, Germany, September 7-10, 1998. – Vol. 2. – P. 1136-1140.
13. *Iancu I.* Propagation of uncertainty and imprecision in knowledge-based systems // Fuzzy Sets and Systems. – 1998. – № 94. – P. 29-43.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Карелин.

Боженюк Александр Витальевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: avb002@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: 88634371743; кафедра прикладной информатики; д.т.н.; профессор.

Опенько Наталья Сергеевна – e-mail: openko.natalya@mail.ru; кафедра прикладной информатики; аспирантка.

Bozhenyuk Alexander Vitalievich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: avb002@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371743; the department of applied information science; professor.

Openko Natalia Sergeevna – e-mail: openko.natalya@mail.ru; the department of applied information science; postgraduate student

УДК 519.688:[519.17+681.518]

С.Л. Беляков, М.Н. Савельева

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ПРИ ЛОГИСТИЧЕСКОМ РОУТИНГЕ*

Анализируется модель роутинга, использующая для накопления и обработки опыта картографическую базу данных ГИС. Особенность анализируемой модели состоит в использовании электронных географических карт, описывающих среду транспортировки через практически опробованные маршруты экспертом-логистом. На основании проверенного пути производится разбиение карты на кластеры. Новизна заключается в том, что предложенный алгоритм поиска наилучшего маршрута реализован на нечетком темпоральном гиперграфе. Ребрами данного гиперграфа являются полученные кластеры. Это позволяет строить более достоверные решения в условиях неопределенности.

ГИС; логистический опыт; кластеризация; маршрутизация; нечеткий темпоральный гиперграф.

S.L. Beliacov, M.N. Savelyeva

CLUSTERIZATION IN LOGISTIC ROUTING

The article covers analysis of the routing model that uses for accumulation and processing experience cartographic database of GIS. Feature of the analyzed model is the use of electronic maps describing the impact of transportation routes through practically tested expert logistician. The partition map into clusters is based on proven route. The novelty lies in the fact that the proposed algorithm for finding the best route is realized on a fuzzy temporal hypergraph. Edges of the hypergraph are obtained clusters. This allows to build more reliable solutions in the face of uncertainty.

GIS; logistic experience; clusterization; routing; fuzzy temporal hypergraph.

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 11-01-00011-а, 10-01-00029-а.

Логистический роутинг представляет собой процедуру нахождения наилучшего в заданном смысле пути транспортировки продукта из одной заданной точки пространства в другую [1]. Сложность решения подобной задачи в многофакторности и неполноте информации о транспортной среде. Качество транспортировки зависит от большого числа показателей, начиная со свойств самого продукта и заканчивая свойствами и поведением объектов и явлений реального мира, оказывающих влияние на продукт. Получить исчерпывающее описание условий реализации логистических проектов практически невозможно, из-за чего большое значение при решении задачи логистического роутинга приобретает опыт экспертов-логистов. Использование опыта представляет несомненный интерес, поскольку на сегодняшний день не удалось найти эффективного пути автоматического решения задачи без участия эксперта.

Использование опыта интеллектуальными информационными системами рассматривается как «сильный» метод решения задач [2]. Как показывает анализ работ [3, 4], методология использования опыта базируется на специфических способах его описания и соответствующей логике построения выводов.

Цель настоящей статьи – анализ модели логистического роутинга, использующей для накопления и использования опыта картографическую базу данных геоинформационных систем (ГИС) [5].

Особенность анализируемой модели состоит в использовании электронных географических карт, описывающих среду транспортировки более содержательно, чем схемы транспортировки или текстовые описания. Содержательность проявляется в том, что всякий маршрут $l \in L$ из множества L практически опробованных маршрутов связывается пространственными, временными и семантическими ссылками с картографическими объектами. Например, водитель грузового такси выбирает маршрут, учитывая не только расстояние между пунктами перемещения, загруженность автомагистрали, её качество, но и риск нахождения удобной парковки для погрузки и разгрузки, степень воздействия на груз погодных условий и природных факторов (пыли, прямых солнечных лучей). В конечном счёте оказывается, что траектория пути явилась конечным результатом сопоставления многих факторов, которые эксперт часто не способен перечислить. Фиксация маршрута в ГИС позволяет локализовать опыт, т.е. указать пространственные, временные и семантические границы конкретного прецедента. Формально маршрут $l \in L$ представляется областью

$$R_l = \{S_l, T_l, C_l\},$$

где S_l – пространственная (область пространства, включающая траекторию перемещения), T_l – временная (расписание движения), C_l – семантическая граница (классы использованных транспортных средств, сетей и складов). Категория области прецедента R_l позволяет строить логистический роутинг на основе двух утверждений:

- ◆ если планируемый маршрут L_p размещается в одной из областей $R_l, l \in L$, то наилучшим решением является повторное использование маршрута $l \in L$;
- ◆ если планируемый маршрут L_p не входит ни в одну из известных областей $R_l, l \in L$, наилучшим решением считается использование ближайшего известного маршрута из $l \in L$.

Приведённые утверждения базируются на логике «здравого смысла» [6], которой пользуются, например, водители такси [7].

Для эффективного использования экспертных данных программами необходимо обработать исходные опытные данные – кластеризовать полученную информацию [8]. Каждый кластер представляет собой обобщение подмножества близких

областей $R_l, l \in L$. Поиск наилучшей траектории перемещения внутри кластера сводится к выбору одного из известных путей. Таким образом, сокращается трудоёмкость поиска наилучшего пути.

Маршрут передвижения R_l представляет собой совокупность участков дороги и пространственные объекты, окружающие данный путь, отраженный на слое карты. Будем считать, что электронная карта состоит из нескольких слоев, причём на первом слое отображается схема дорог, на втором слое отражаются траектории, на третьем слое показаны пространственные объекты, связанные по смыслу с процессом транспортировки. Будем называть эти объекты объектами окружения. Любая траектория с объектами окружения образует область на карте.

Простейший алгоритм кластеризации можно сформулировать следующим образом:

Шаг 1. Построение на карте на втором слое известного маршрута.

Шаг 2. Отбор пространственных объектов, прилегающих к рассматриваемому участку дороги. После этого маршрут можно представить следующим образом:

$$S^j = \sum_{i=1}^n (S_i + E_i),$$

где S^j – траектория передвижения эксперта по маршруту, S_i – участок дороги (схемы) между перекрестками (от вершины до вершины), E_i – объекты окружения для участка дороги S_i .

Шаг 3. Проверяется наличие смежных областей траекторий. Если такие схемы существуют и имеют 2 или более общих участка дороги, то они объединяются в общий кластер $S^j \cap S^{j+1} = \{S_i, S_{i+k}\}, k = \overline{1, m}$.

Приведённый алгоритм использует простейшую метрику расстояния – Евклидову: $D_{S_i S_k} = \sqrt{\sum (S_i - S_k)^2}$. Более сложные метрики могут отражать задержку доставки, обработки груза, степень риска возникновения нештатных ситуаций.

Кластеризация области карты, используемой для логистического рутинга, позволяет строить поиск маршрутов как процедуру выбора смежных кластеров между начальным и конечным пунктом транспортировки.

Задачу поиска кратчайшего пути следует проводить, используя модель нечёткого темпорального гиперграфа.

Нечетким темпоральным гиперграфом называется тройка $\tilde{G} = (X, \tilde{E}_t, T)$, где $X = \{x_i\}, i = \overline{1, n}$ – множество вершин гиперграфа, $T = \{1, 2, \dots, N\}$ – множество натуральных чисел, определяющих (дискретное) время, $\tilde{E}_t = \{ \langle \mu_t(\tilde{e}_j) | \tilde{e}_j \rangle \}$ – нечеткое множество ребер, где $\tilde{e}_j \in \tilde{E}_t, j = \overline{1, m}$, причем $\tilde{e}_j \neq \emptyset$ и $\bigcup_{j=1}^m \tilde{e}_j = X, \mu_t(\tilde{e}_j)$ – значение функции принадлежности, выраженное нечетким числом μ_t для ребра \tilde{e}_j в момент времени $t \in T$, причем для различных моментов времени для одного и того же ребра \tilde{e}_j значения функции принадлежности различны (в общем случае) [9, 10, 11].

Построение маршрута между двумя вершинами возможно только, если все ребра в нечетком темпоральном гиперграфе смежны $\tilde{e}_i \cap \tilde{e}_j \neq \emptyset; i \neq j; i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$, а также нечетко смежны по моменту времени. Вершина x_j является нечетко смежной вершине x_i по моменту времени $t \in T$, если выполняется условие $\mu_t(\tilde{e}_j) > 0, x_i, x_j \in \tilde{e}_j$.

Нечетким путем $\tilde{L}(x_i, x_k)$ нечеткого темпорального гиперграфа является последовательность нечетких ребер, ведущих из вершины x_i в вершину x_k , в которой конечная вершина всякого ребра, отличного от последней, является начальной вершиной следующего ребра:

$$\tilde{L}(x_i, x_k) = \langle \mu_{t_1}(\tilde{e}_{j_1}) | \tilde{e}_{j_1} \rangle, \langle \mu_{t_2}(\tilde{e}_{j_2}) | \tilde{e}_{j_2} \rangle, \dots, \langle \mu_{t_k}(\tilde{e}_{j_k}) | \tilde{e}_{j_k} \rangle,$$

где $\tilde{e}_{j_1} \in \{x_i, x_1, \dots\}, \tilde{e}_{j_2} \in \{x_1, x_2, \dots\}, \dots, \tilde{e}_{j_k} \in \{x_{k-1}, x_k, \dots\}$, для которого выполняются условия $\mu_{t_1}(\tilde{e}_{j_1}) > 0, \mu_{t_2}(\tilde{e}_{j_2}) > 0, \dots, \mu_{t_k}(\tilde{e}_{j_k}) > 0$, а для моментов времени $t_1, t_2, \dots, t_k \in T$ выполняется неравенство $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_k$.

В действительности довольно проблематично построить такой гиперграф из-за отсутствия проверенных маршрутов, поэтому, в случае если не все ребра гиперграфа смежны, переходим к алгоритму, описанному ниже. В нем обобщены свойства кластеров, которые выражены в виде ребра нечеткого темпорального гиперграфа. Все вершины, которые не вошли в кластер, соединены дугами и обладают всеми свойствами графа, их пропускные способности не изменяются в зависимости от времени.

Шаг 1. Перед началом алгоритма все вершины и дуги не окрашены (используется понятие “окрашивание вершин”, которое подразумевает, что все вершины обработаны и помечены одним цветом).

Шаг 2. Проверка: принадлежит ли вершина x_s какому-нибудь ребру гиперграфа. Если вершина принадлежит ребру $x_s \in \tilde{e}_i$, то переход к шагу 7. Если вершина не принадлежит $x_s \notin \tilde{e}_i$, то надо найти ближайшее ребро. Для этого необходимо произвести поиск в начале центра ребра (это возможно в связи с тем, что данный гиперграф является обобщением кластеризации, поэтому центр ребра обладает свойствами центра кластера). Центром кластера является среднее геометрическое место точек в пространстве переменных. Поэтому центр ребра можем определить следующим образом:

$$g_i(\tilde{e}_i) = \left(\prod_{i=1}^n x_i \right)^{1/n},$$

g_i – центр ребра, где i – элементы, принадлежащие ребру \tilde{e}_i .

Шаг 3. Определить ближайшее к начальной вершине x_s ребро: $b_s = \min \sqrt{(x_s - g_i)^2}$, b_s – расстояние между начальной вершиной и центром ребра.

Шаг 4. Проверить, существует ли ребро \tilde{e}_i в момент времени t . Если данное ребро существует, то переходим в него, если же не существует, то производится новый поиск ребра.

Шаг 5. Определяется ближайшая вершина x к вершине x_s , $b_x = \min \sqrt{(x_s - x)^2}$.

Шаг 6. Строится путь из начальной вершины x_s в вершину x , используя алгоритм Дейкстры. Переходим к шагу 8.

Шаг 7. Если же начальная вершина принадлежит ребру $x_s \in \tilde{e}_i$, то вначале производится проверка на нечеткую смежность вершин по моменту времени $\mu_t(\tilde{e}_i) > 0$, $x_s, x \in \tilde{e}_j$, далее производится проверка принадлежности конечной вершины найденному ребру, если $x_k \in \tilde{e}_i$, то строится опытный маршрут, ребро окрашивается. Если же $x_k \notin \tilde{e}_i$, то тогда переходим на шаг 8.

Шаг 8. Поиск смежного ребра с \tilde{e}_i среди неокрашенных ребер, т.е. $\tilde{e}_i \cap \tilde{e}_j \neq \emptyset$. Если такое ребро существует, то переход в ребро \tilde{e}_j , в котором прокладывается опытный маршрут через смежную по времени вершину, ребро окрашивается. Если $\tilde{e}_i \cap \tilde{e}_j = \emptyset$, то переход к шагу 9.

Шаг 9. Нахождение ближайшего ребра \tilde{e}_j к ребру \tilde{e}_i , следующим образом:

$b = \min (|g_i - g_j|)$ – расстояние между кластерами, $g_i \in \tilde{e}_i$ – текущий центр ребра, $g_j \in \tilde{e}_j$ – искомый центр ребра.

Шаг 10. Проверить расстояние между центром ребра g_i и конечной вершиной x_k и расстояние между новым центром g_j и конечной вершиной x_k . Если $(g_i, x_k) \geq (g_j, x_k)$, то производится поиск маршрута между ребрами гиперграфа. Переход к шагу 4.

Шаг 11. Если $(g_i, x_k) < (g_j, x_k)$, то производится поиск ближайшей вершины к вершине x_k . Далее производится построение маршрута по алгоритму Дейкстры.

В результате проведенного анализа могут быть сделаны следующие выводы.

Представление опыта транспортировки как областей в картографической среде ГИС локализует опыт. Это позволяет строить более достоверные решения в условиях неопределённости.

Для повышения скорости решения задачи роутинга предлагается кластеризовать прецеденты, что с логической точки зрения является обобщением.

Наилучший маршрут строится на основе представления области анализа нечётким гиперграфом. Это позволяет учесть фактическую неопределённость, порождённую обобщением опыта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логистика автомобильного транспорта: Учеб. пособие / В.С. Лукинский, В.И. Бережной, Е.В. Бережная и др. – М.: Финансы и статистика, 2004.
2. *Лорьер Ж.-Л.* Системы искусственного интеллекта: Пер. с франц. – М.: Мир, 1991.
3. Использование прецедентного анализа при решении логистических задач [Текст] / Л.В. Гордиенко // Научная сессия МИФИ-2008. Т. 10. – С. 137-138.
4. *Беляков С.Л., Гордиенко Л.В.* Прецедентный анализ логистических операций в геоинформационных системах // Программные продукты и системы. – 2008. – № 4.
5. Геоинформатика: Учеб. для студ. вузов / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев, В.С. Тикунов и др / Под ред. В.С. Тикунова. – М.: Изд. центр «Академия», 2005.
6. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука. – Гл. ред. Физматлит, 1986.
7. Программа Microsoft "Месть Таксиста" – опыт таксистов vs. Google Maps. – http://www.testauto.ru/page2_17_2606.html.
8. Data Mining: Учебное пособие / И.А. Чубукова – М.: Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
9. *Берштейн Л.С., Боженик А.В.* Нечеткие графы и гиперграфы. – М.: Научный мир, 2005.
10. *Берштейн Л.С., Боженик А.В.* Использование темпоральных графов как моделей сложных систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 4 (105). – С. 198-203.
11. Определение сильной связности нечетких темпоральных графов / Л.С. Берштейн, А.В. Боженик, И.Н. Розенберг. XII Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.П. Карелин.

Беляков Станислав Леонидович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: beliacov@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371743; кафедра прикладной информатики; д.т.н.; профессор.

Савельева Марина Николаевна – e-mail: marina.n.savelyeva@gmail.com; кафедра прикладной информатики; аспирантка.

Beliacov Stanislav Leonidovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: beliacov@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; тел.: +78634371743; the department of applied information science; dr. of eng. sc.; professor.

Savelyeva Marina Nikolaevna – e-mail: marina.n.savelyeva@gmail.com; the department of applied information science; postgraduate student.