Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. А. Акулов, В. И. Батищев, Оценка адекватности искусственной и естественной сил тяжести методами многомерного анализа, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2006, выпуск 42, 174–178

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu429>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.224.187.69

26 апреля 2023 г., 15:43:45

Системный анализ

УДК 681.51.012+004.93'1+004.8

В. А. Акулов, В. И. Батищев

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ ИСКУССТВЕННОЙ И ЕСТЕСТВЕННОЙ СИЛ ТЯЖЕСТИ МЕТОДАМИ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА

Предложен системный подход к решению задачи адекватности искусственной (центрифуга) и естественной (Земля) силы тяжести, который трансформировал ее к задаче распознавания ряда эргатических систем. Построена автоматизированная система распознавания на основе алгоритмов обучения и компьютерных программ обработки многомерных данных. Выполнена серия вычислительных экспериментов с реальными исходными данными, показавшая высокую эффективность предлагаемых подходов.

Введение. Невесомость относится к числу крайне негативных факторов космических полетов. Являясь чуждой по отношению к человеку средой обитания, она оказывает повреждающее воздействие на его организм [1, 2]. В связи с этим применяется ряд средств противодействия, как, например специальный «костюм», создающий отрицательное давление в нижней части тела (ОДНТ). Современный этап характеризуется широкомасштабными исследованиями, ориентированными на разработку и внедрение наиболее радикального средства борьбы с невесомостью, каковым является искусственная сила тяжести (ИСТ). В качестве реального генератора ИСТ рассматривается так называемая центрифуга короткого радиуса (ЦКР), представляющая собой портативный вариант применяемых в настоящее время наземных центрифуг [1, 2]. Таким образом, речь идет о физическом моделировании гравитации путем перемещения человека из одной вращающейся системы (Земля) в другую – ЦКР. В результате смены среды обитания неизменно возникает сложная междисциплинарная проблема (техника – медицина) обеспечения адекватности модельной и естественной силы тяжести.

Нетрудно заметить, что отличия в параметрах вращения рассматриваемых объектов весьма существенны. Достигая величин 5 – 6 порядков, они, в конечном итоге, затрудняют осуществление имитации земных условий. Так, например, радиус вращения Земли значителен, составляет по величине $6,4 \cdot 10^6$ м, а на ЦКР он менее 2 м. Несоизмеримы также угловые скорости вращения (ω). В первом случае $\omega = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, т. е. ничтожно мала, постоянна по величине и направлению. Во втором – она переменна по направлению, ее величина на порядки больше (номинальное значение 3 – 4 с^{-1}). Кроме того, она изменяется в весьма широком диапазоне [2]. Учитывая изложенное, легко сформулировать следующее четыре утверждения. Во-первых, отличия неизбежны. Во-вторых, эти отличия требуют количественной оценки. В-третьих, необходима оценка значимости имеющихся отличий. В-четвертых, необходима разработка механизмов управления степенью рассогласований. В итоге приходим к серии задач, порожденных проблемой адекватности ИСТ и естественной силы тяжести (ЕСТ). Некоторые из технических аспектов, связанных с воспроизведением динамического компонента искусственной силы тяжести, обсуждаются ниже.

Постановка задачи. Совершенно очевидно, что генерация ИСТ не является самоцелью. Она призвана минимизировать отличия от норм жизненно важных параметров организма человека, вызванные отсутствием силы тяжести. Это в полной мере относится к динамическому компоненту кровотока, обусловленному насосной функцией сердца. В медицинских терминах это означает воспроизведение линейной скорости кровотока (ЛСК). В итоге проблема адекватности трансформируется в проблему системного анализа, требующего рассмотрения как единого целого технического средства космонавта (ЦКР) и его организма. В свою очередь системный анализ требует разработки соответствующих информационных технологий (ИТ) и проблемно ориентированных вычислительных процедур.

Как следует из изложенного, совершенно естественным путем формируются две системы (кластера), а именно: «человек – Земля» и «человек – ЦКР». Для первой из них имеются официальные (медицинские) нормы, касающиеся параметров кровообращения в различных точках тела. Задача, казалось бы, принимает тривиальный характер, заключающийся в сопоставлении параметров ЛСК на ЦКР с нормой (попадание случайной величины в заданный интервал – норму). Однако реальная ситуация намного сложнее. Прежде всего, нормы установлены для положения «лежа» (клино-статика), в то время как имитационному моделированию подлежит поза «стоя» (ортостаз) [2]. В соответствии с литературными данными, отличия в параметрах ЛСК для указанных поз составляют до 38% [3]. Проведенные нами исследования вопроса с более детальной группировкой (возраст, пол) показали, что отличия в амплитудных значениях антеградного потока в бедренных артериях в зависимости от позы более значительны и достигают величин 40 – 48% [4, 5]. В итоге система «человек – Земля» расчленяется на две подгруппы: «человек (клино-статика) – Земля», «человек (ортостаз) – Земля» (рис. 1, поз. 1, 2). Особо подчеркнем, что именно вторая система является объектом моделирования, но именно она оказалась вне поля зрения «земной» медицины.

Р и с. 1. Основные объекты системного анализа и классификации в задачах оценки адекватности ИСТ и ЕСТ

Профессиональная деятельность космонавтов связана с пребыванием еще в двух средах (поз. 4, 5). Таким образом, номенклатура объектов исследований расширяется до пяти позиций, а задача адекватности ИСТ и ЕСТ (поз. 2, 3) становится составной частью более общей задачи – классификации и распознавания объектов (эргатических систем), представленных на рис. 1. При этом по четырём позициям (1, 2, 4, 5) имеется информация по ЛСК, а по позиции 3 ее предстоит получить.

Учитывая изложенное, ставится задача разработки проблемно–ориентированной методики, а также соответствующих процедур классификации и распознавания специфических объектов, связанных с генерацией ИСТ, на основе данных о параметрах нестационарного компонента системы кровообращения, отвечающей следующим требованиям:

- системный подход на основе формирования эргатических систем;
- автоматизированная классификация систем на основе методов многомерного анализа;
- автоматизированная оценка непротиворечивости классификации;
- автоматизированное отнесение неизвестного (неклассифицированного) объекта к имеющимся классам с применением обучающих алгоритмов;
- автоматизированная оценка адекватности искусственной и естественной гравитации в части воспроизведения параметров ЛСК в магистральных сосудах;
- доступность методики врачам космической медицины (гравитационной физиологии);
- выдача рекомендаций по направлениям дальнейших исследований.

В конечном итоге ставится задача построения автоматизированной системы распознавания эргатических систем (поз. 1–5, рис. 1) на основе существующих алгоритмов обучения и компьютерных программ обработки многомерных данных, ориентированной на проблемы адекватности ИСТ и ЕСТ.

В результате применение методов многомерного анализа (кластеризация и адаптивные процедуры распознавания образов) возможны два основных исхода. Первый из них - системы

«человек – ЦКР» и «человек (ортостаз) – Земля» принадлежат к одному кластеру (группе с идентичными параметрами). Тогда с технической точки зрения адекватность достигнута. Такой исход является наиболее благоприятным, и он потребует относительно небольшого объема медицинских исследований на предмет допустимости имеющихся отличий. Если же указанные системы распределятся по различным классам (кластерам), т. е. продемонстрируют существенное различие в параметрах кровообращения, ситуация осложнится. Возникнет необходимость в коррекции параметров ИСТ и выполнении весьма значительных по объему медицинских исследований. Обобщая сказанное подчеркнем, что вне зависимости от исходов, поставленные задачи приобретают весьма важное практическое значение. В конечном счете, речь идет о принятии решений относительно перспектив применения ЦКР в космическом полете на основании как медицинских, так и технических аспектов ИСТ и выработке требований к проектным параметрам ЦКР, а также системе управления и регистрации данных.

Методика и основные результаты исследований. Как известно, одной из главных проблем многомерного анализа является выбор информативных признаков, наиболее полно отражающих специфику объектов исследований и служащих основой для классификации [6]. Эта проблема в полной мере возникла при разработке настоящей методики, причем она усугублялась отсутствием ближайших аналогов. Учитывая опыт, полученный при решении задач адекватности одномерными методами (непараметрический анализ) [4,5, 7], в качестве признака было выбрано пиковое значение антеградного потока в бедренной артерии (рис. 2, точка А).

Р и с. 2. Типовая зависимость мгновенной скорости кровотока V в бедренной артерии по времени (t) в течение сердечного цикла (схема)

Именно этот параметр наиболее существенно откликнулся на ортопробы, т.е. на изменение направления вектора гравитации. Кроме того, на выбор параметра повлияли такие обстоятельства, как отсутствие инвазивности (ЛСК измеряется методами ультразвуковой доплерографии (УЗДГ)), относительная доступность аппаратуры УЗДГ, реализуемость УЗДГ в космическом полете (см. поз. 4, 5, рис. 1) и условиях ЦКР.

Что касается кластеризации, она выполнялась для двух систем (поз. 1, 2, рис. 1) и двумя способами: на основе физических предположений (рис. 1), и путем выполнения

полноценного кластерного анализа. В качестве основного применен принцип геометрической близости [8].

Исходными данными для анализа послужили результаты ортопроб [3, 4]. При этом четыре

STADIA 6.3/base для Windows (C) Кулаичев А.П., 1996-2002, для DOS: 1988-1996

Файл График=F6 Вычисл=F7 Преобр=F8 Статист=F9 Окна Помощь=F1

ВсехX=6, x

Таблица данных: kulaich1.std

	x1	x2	x3	x4	x5	x6
1	45	51	48	40	68	1
2	59	52	93	59	64	1
3	50	51	70	50	66	1
4	55	51	77	52	62	1
5	28	41	24	22	38	2
6	30	45	40	26	30	2
7	40	44	45	24	33	2
8	44	47	55	29	26	2
9	21	39	25	28	44	0

Р и с. 3. Исходные данные для кластерного и дискриминантного анализа. Объекты (строки) 1 – 4, 5 – 8 обучающие выборки по кластерам 1, 2. Объект № 9 подлежит классификации

объекта (строки 1 - 4, рис. 3), каждый из которых состоял из пяти представителей (столбцы x1–x5), были выбраны из группы «человек (клиностастика) – Земля». Им присвоен код кластера 1 (столбец x6). Строки (объекты) 5–8 составлены из представителей группы «человек (ортостаз) - Земля», которым присвоен код кластера 2.

Были апробированы различные стратегии кластеризации. В качестве иллюстрации на рис. 4 приведен один из полученных результатов в виде дендрограммы.

Здесь по горизонтали отложены номера исследуемых объектов (номера строк в базе данных (рис. 3)), а по вертикали евклидовы расстояния $d_{i,k}$ между i -м и k -м объектами в многомерном векторном пространстве. Расчеты выполнены по формуле:

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{kj})^2},$$

где p – размерность пространства. В данном случае $p = 5$, $i = \overline{1,8}$, $k = \overline{1,8}$, $i \neq k$.

В результате автоматической кластеризации выделены две группировки. Одну из них (область А) образуют объекты 1–4 (клиностастика), а вторую (область Б) – объекты 5–8 (ортостаз). Как видно, результаты «ручной» кластеризации, выполненной по признаку «среда обитания» (рис. 3, столбец хб), согласуются с результатами компьютерного кластерного анализа, что весьма важно.

Как известно, кластерный анализ не оценивает непротиворечивость полученной классификации. Такая оценка является типовой задачей дискриминантного анализа. В результате его выполнения показано, что вероятность гипотезы H_0 (невозможность предлагаемой классификации) равна нулю. Таким образом, априорная классификация является обоснованной. Кроме того, вычислены коэффициенты дискриминантной функции $a[0]$, $a[1]$, ..., $a[5]$, обобщенное и внутригрупповые расстояния Махаланобиса.

В ходе дискриминантного анализа решалась еще одна важная задача по отнесению нового объекта к одному из известных классов. Эта задача является составной частью оценки адекватности ИСТ (ЦКР) и ЕСТ (Земля, ортостаз). Ситуация осложняется тем, что ЛСК на ЦКР еще не измерялась. Это отдельная, сложная медико-техническая задача. Авторы осуществляют интенсивную подготовку к ее реализации. Составной частью указанной подготовки является всесторонняя отладка информационных технологий, ориентированных на обработку результатов предстоящих экспериментов. В ходе отладки была выполнена серия тестов. Тесты заключались в том, насколько надежно отнесет дискриминантный анализ, построенный по предлагаемой схеме и использующий выбранные параметры, «неизвестный» для него объект к группе, заранее выбранной исследователем. Одним из методических приемов являлся выбор «неизвестных» для распознавания объектов. В их качестве выбирались объекты, участвовавшие в ортопробах, но не задействованные в базе (рис. 3).

В целях повышения надежности распознавания были применены обучающиеся алгоритмы. Как показали многочисленные вычислительные эксперименты, ни одного случая ошибочной классификации не выявлено. Что касается применяемых программных средств, то многомерный анализ выполнялся в среде Stadia 6.3 [8].

Закключение. Оценка адекватности модельной силы тяжести (центрифуга) по отношению к земной является, с одной стороны, задачей, ориентированной на перспективу космонавтики, а, с другой, - находящейся в стадии изучения. Как вариант ее решения нами предлагается системный подход. При этом формируются пять эргатических систем (рис. 1). В результате задача оценки адекватности ИСТ и ЕСТ переходит в категорию задач оценки «различий между двумя и более группами объектов по нескольким переменным», что, как известно, относится к предметной области дискриминантного анализа [8]. В качестве выходного параметра выбрано пиковое значение антеградного потока в бедренной артерии, характеризующего динамическую составляющую кровотока (ЛСК), обусловленную насосной функцией сердца.

Р и с. 4. Результаты кластерного анализа по схеме «евклидова метрика – стратегия ближайшего соседа»

Предложены информационные технологии и соответствующие процедуры, ориентированные на решение задачи «динамической» адекватности. Построена система распознавания объектов, основанная на принципах геометрической близости (евклидова метрика и расстояние Махаланобиса). Выполнена ее отладка и апробация на реальной информации, полученной в ходе специальных экспериментов (ортостатические пробы – переход из положения «лежа» в положение «стоя»). Показано, что в случае применения режимов обучения дискриминантный анализ обеспечивает уверенное распознавание объектов. С практической точки зрения важны два обстоятельства. Во-первых, полученные результаты, относящиеся к системам «человек (клиностастика) – Земля» и «человек (ортостаз) – Земля», находятся в полном соответствии с результатами медицинских исследований, дополняя друг друга. Во-вторых, выполнена информационная подготовка к осуществлению уникального эксперимента по измерению нестационарного кровотока в условиях искусственной силы тяжести и, главное, объективной оценки его адекватности.

Что касается направлений дальнейших исследований, кроме выполнения упомянутых экспериментов на ЦКР, необходимо продолжение работ по обобщению данных (кластерный и дискриминантный анализ) по всей совокупности представленных эргатических систем (рис. 1) и выдаче соответствующих рекомендаций лицам, принимающим стратегические решения в области пилотируемой космонавтики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Газенко О. Г., Григорьев А. И., Егоров А. Д. //От 108 минут до 438 суток и далее... (к 40-летию полета Ю. А. Гагарина) // Авиакосм. и эколог. мед., 2001. Т. 35 №2. С. 10-11.
2. Котовская А. Р., Шипов А. А., Виль –Вильямс И. Ф. Медико–биологические аспекты проблемы создания искусственной силы тяжести. М: Слово, 1986. С. 203.
3. Модин А. Ю, Шапков., В. С. Влияние гравитации на линейную скорость кровотока в артериальном русле здорового человека // Авиакосм. и эколог. мед., 2002. Т. 36, №4. С. 26–29.
4. Акулов В. А.. Стохастическая модель отклика системы кровообращения на внешние возмущения /// Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки, 2005. № 38. С. 72–77.
5. Акулов В. А. Биомеханический критерий адекватности модельной и естественной силы тяжести // Авиакосмическая и экологическая медицина, 2005. №1. С. 129–136.
6. Ту Дж., Гонсалес Р.. Принципы распознавания образов. М: Мир. 1978. С. 414.
7. Акулов В. А. Гравитационная терапия: четыре аспекта моделирования гемодинамики конечностей // Вестн. Сам. гос. аэрокосм. ун-та, 2004. №1 (5). С. 61–67.
8. Кулаичев А. П. Методы и средства анализа данных в среде Windows STADIA 6.0. М: НПО «Информатика и компьютеры», 1996. 255 с.

Поступила 15.12.2005 г.