

А.Н. Самойлов, Ю.М. Бородинский

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ*

С развитием возможностей мобильных устройств и повышением доступности беспроводной связи существенно расширились возможности построения промышленных систем автоматизации. Качество цифровой фотографии, получаемой с помощью камеры смартфона, позволяет строить мобильные системы, основанные на компьютерном зрении: например, системы фотограмметрии. При этом следует учитывать несколько факторов. Первый фактор – задачи обработки цифровой фотографии в промышленных целях остаются ресурсоемкими и не могут быть полноценно реализованы только на базе мобильного устройства. Следовательно, требуется перенос среды выполнения ресурсоемких задач на сторонние вычислительные мощностями, доступные по требованию. Вторым фактором – стабильность и полоса пропускания канала связи – мобильные устройства как правило нужны в отдаленных местах, где развертывание стационарных компьютеров не представляется возможным. Следовательно, использование смартфона только в качестве фотоаппарата не всегда оправдано, так как передача необработанного изображения может занять длительное время или вовсе оказаться невозможной. Третьим фактором, препятствующим широкому применению мобильных устройств в решении фотограмметрических задач, – это вариативность и постоянное появление новых методов обработки и анализа изображений. Необходимо централизованно создавать и пополнять библиотеки таких модулей. Таким образом, создание мобильных фотограмметрических измерительных систем требует объединения вычислительной мощности облачных сервисов и мобильности смартфонов. В статье предлагается метод построения фотограмметрических измерительных систем на основе мобильных облачных вычислений, который обеспечивает динамический баланс вычислительной нагрузки на узлы системы, а также вариативность функциональных возможностей на мобильных устройствах пользователей.

Фотограмметрия; облачные вычисления; сервис; трубная промышленность; лесная промышленность; мобильные технологии.

A.N. Samoylov, Yu.M. Borodyansky

MOBILE-CLOUD SYSTEM FOR SOLVING PHOTOGRAMMETRY TASKS IN INDUSTRY

With the development of the capabilities of mobile devices and the increase in the availability of wireless communication, the possibilities of building industrial automation systems have significantly expanded. The quality of digital photography obtained with a smartphone camera makes it possible to build mobile systems based on computer vision: for example, photogrammetry systems. There are several factors to consider. The first factor is that the tasks of processing digital photography for industrial purposes remain resource-intensive and cannot be fully implemented only on the basis of a mobile device. Therefore, it is required to transfer the execution environment for resource-intensive tasks to third-party computing power available on demand. The second factor is the stability and bandwidth of the communication channel - mobile devices are usually needed in remote locations where the deployment of desktop computers is not possible. Therefore, using a smartphone only as a camera is not always justified, since the transfer of an unprocessed image may take a long time or even be impossible. The third factor hindering the widespread use of mobile devices in solving photogrammetric problems is the variability and constant emergence of new methods of image processing and analysis. It is necessary to centrally create and replenish libraries of such modules. Thus, the creation of mobile photogrammetric measuring

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00577.

systems requires combining the computing power of cloud services and the mobility of smartphones. The article proposes a method for constructing photogrammetric measuring systems based on mobile cloud computing, which provides a dynamic balance of the computational load on the nodes of the system, as well as the variability of functionality on mobile devices of users.

Photogrammetry; cloud computing; service; pipe industry; forest industry; mobile technologies.

Введение. Разработка систем промышленного назначения, основанных на технологиях компьютерного зрения, является одним из активно развивающихся направлений в современной науке и практике. В рамках данного направления выделяется класс измерительных систем, основанных на методах фотограмметрии [1–5]. Преимущество использования таких систем состоит в относительно низкой себестоимости измерений при достижении приемлемого качества результатов [4, 5]. Тем не менее несмотря на развитие математического обеспечения [6], создание новых алгоритмов и технологий [7, 8], в данной области остаются нерешенными несколько важных проблем. Первой проблемой является мобильность измерительных комплексов. Как показывает практика, подавляющее большинство современных сертифицированных измерительных комплексов основываются на использовании профессиональной цифровой фототехнике и мощных переносных компьютерах. Это обуславливается ограничениями методов обработки изображений и их вычислительной сложностью. Второй проблемой является эксплуатационная сложность, которая требует от пользователя множества навыков, в том числе цифровой фотографии и использования специализированного программного обеспечения.

Решение данных проблем может быть найдено в применении комплекса, состоящего из мобильного устройства (смартфона/планшета) и облачных вычислений [9, 10]. Но появлению подобных систем препятствует ряд факторов, связанных с низкой вычислительной мощностью мобильных устройств и ограничениями каналов передачи данных, не позволяющих передавать необработанные изображения на облачный сервер [1]. Всё это приводит к проблеме поиска баланса нагрузки между мобильным устройством и облачным сервером, который в каждой отдельно взятой ситуации является уникальным. Мы можем достоверно знать только предельные его значения. Для ситуации, где скоростной доступ в интернет отсутствует, оптимальным является выполнение предварительной обработки изображений и первичного вычисления показателей на мобильном устройстве с последующей передачей результатов на облачный сервер для выполнения процедуры измерения. Это существенно сказывается на энергопотреблении мобильного устройства и скорости выполнения измерений. В случае, когда Интернет-соединение стабильное и устойчивое, а его скорость соответствует стандартам 4G/LTE, оптимальной будет конфигурация измерительной системы, при которой мобильное устройство выполняет только функции фотоаппарата, передавая цифровые изображения на облачный сервер.

Проведенные исследования показали, что в 65% случаев на местах проведения измерений Интернет-соединение является неустойчивым и не позволяет стабильно передавать данные с высокой скоростью. В то же время оно не является настолько медленным, чтобы выполнять все вычислительные операции на мобильном устройстве. Таким образом, нам требуется синтезировать измерительные системы динамически, основываясь на конкретной ситуации. Принимая во внимание то, что квалификация персонала в области ИТ, в реальности занимающегося измерительными операциями, не является высокой [2, 3], синтез должен происходить автоматически, а сама система с точки зрения эксплуатации должна оставаться неизменной. Далее в статье мы рассмотрим разработанный нами метод построения мобильно-облачных измерительных систем, который позволяет динамически синтезировать мобильно-облачные измерительные системы. Научной но-

визной является подход синтеза прикладных измерительных систем, который базируется на сочетании мобильных и облачных технологий и отличается полной автономностью и способностью адаптироваться под условия эксплуатации, в частности стабильность и скорость соединения между мобильной и облачной частями.

Особенности измерительных систем. В настоящее время программная инженерия и смежные области наук, связанные с созданием программных комплексов, на пересечении областей знаний с измерительной техникой решают задачи разработки прикладных одиночных решений.

В основе разработанного метода лежит принцип обратной связи, на основе которого обеспечивается робастность системы. Критерием робастности в данном случае является способность измерительного комплекса выдавать результаты измерения с заданной погрешностью, которая достигается при минимальной вычислительной нагрузке на мобильное устройство. Последнее является основополагающим для систем подобного рода, поскольку напрямую влияет на производительность сотрудника, выполняющего измерения. Необходимо учитывать, что реализация алгоритмов обработки и анализа изображений на мобильном устройстве отличается от реализации на облачных серверах [11, 12]. Существенная разница в вычислительной мощности требует упрощения вычислений и, как следствие, вызывает снижение точности результатов, полученных преимущественно на мобильном устройстве. Поэтому каждый раз, перед началом измерительной процедуры требуется определить пороговые значения для пропускной способности канала связи, требуемый уровень погрешности измерения и конфигурацию измерительной системы. Именно для этих целей применяется обратная связь, с помощью которой вычисляется отклонение от эталонных значений.

Серия произведенных исследований и экспериментов показала, что принятие решения о синтезе конкретной конфигурации системы только формальными математическими методами не представляется возможным [2–5]. Стохастический характер процедуры измерения не позволяет вывести уравнения, которые описывали бы процедуру выбора. В то же время принятие решения пользователем также невозможно, поскольку его квалификации для этого недостаточно. Единственный выход из данной ситуации состоял в использовании теории систем, основанных на знаниях. Эти знания должны быть заложены в базовую измерительную систему, которая принимает конечный вид для каждой измерительной процедуры путём конфигурирования [13, 14]. Структура базовой измерительной системы [15] может быть графически изображена следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Структура базовой измерительной системы

В структуре базовой измерительной системы предусмотрены все возможные варианты эксплуатации, от полного отсутствия канала мобильной связи, до ситуации с высокоскоростным стабильным соединением. В состав облачного сервера [16] включены:

1. Полные версии реализации методов для предварительной обработки и анализа изображений, а также методов выполнения измерений. Методы хранятся в виде пополняемой библиотеки для того, чтобы измерительная система могла эволюционно развиваться вместе с появлением новых разработок. Библиотека, в свою очередь, описывается онтологией методов и их комбинаций [17, 18].

2. База знаний, которая содержит паттерны для case-based reasoning (CBR), также содержащиеся в онтологии методов и их комбинаций. С помощью CBR [19, 20] мы решаем проблему невозможности математического решения задачи синтеза прикладной измерительной системы. Каждый кейс в CBR – экспертное решение проблемы синтеза. В нем содержится конкретная комбинация методов и их параметры, которые позволяют достичь наилучшего результата. Алгоритмы системы, в свою очередь, решают задачу поиска наиболее релевантного кейса к конкретной измерительной задаче. В базе знаний также содержатся производственные правила, с помощью которых происходит принятие решения о конкретной конфигурации измерительной системы в части балансировки нагрузки между мобильным устройством и сервером. Данная задача не является тривиальной, так как подсчет количества круглого лесоматериала и измерение объема металлопроката на одном и том же интернет-соединении и при одном и том же требовании к допустимой погрешности решаются по-разному. В первом случае достаточно бинаризации изображения на мобильном устройстве и подсчета областей без передачи на сервер. Во втором, наоборот, требуется серия вычислений и анализа, приводящего к наиболее точному выделению контуров объектов определению их физических размеров, что на мобильном устройстве не всегда выполнимо.

3. Модуль для синтеза конфигураций. Данный модуль осуществляет обработку онтологии методов и их комбинаций с учетом кейсов CBR, а также выполняет вычисления на основе производственных правил. Результатом работы модуля всегда является конкретный набор методов, их параметры и расположение имплементации (облачный сервер или мобильное устройство). Конфигурации, которые встречаются наиболее часто (в 80% и выше случаев), попадают в отдельную базу данных предопределенных, которая синхронизируется с мобильным устройством при каждом устойчивом соединении с сервером.

4. Модуль оценки качества соединения. С помощью модуля собираются исходные данные для принятия решения о балансировке вычислительной нагрузки. Данный модуль служит для того, чтобы определить возможность передачи данных, содержащихся в результате каждого этапа работы измерительного комплекса (фотография, предварительная обработка, анализ и измерение).

В состав мобильного устройства, в свою очередь, входят:

1. Модуль получения изображений высокого разрешения. Данный модуль базируется на разработанных нами ранее алгоритмах, позволяющих получать изображения сколь угодно высокого разрешения путем склейки фрагментов. Фрагментация и склейка базируются на принципе матрицы матриц и сеточного разбиения изображения общего плана.

2. Упрощенные реализации методов для предварительной обработки и анализа изображений, а также методов выполнения измерений. Данный набор содержит программные реализации методов, оптимизированные для выполнения на мобильном устройстве. Оптимизация в подавляющем большинстве случаев достигается путем снижения точности результатов, поэтому данные методы относятся к классу «упрощенных».

3. Набор предопределенных конфигураций измерительной системы. Это обновляемая база данных конфигураций, в которых содержится необходимый для автономного принятия решения набор данных. С помощью данного компонента

измерительная система способна при полном отсутствии Интернет-соединения с облачным сервером выполнять свои функции. Единственным ограничением является точность решения задач, так как встроенный в мобильное приложение набор реализаций методов является упрощённым.

4. Модуль оценки качества соединения. С помощью модуля собираются исходные данные для принятия решения о балансировке вычислительной нагрузки. Данный модуль служит для того, чтобы определить возможность передачи данных, содержащихся в результате каждого этапа работы измерительного комплекса (фотография, предварительная обработка, анализ и измерение)

5. Графический интерфейс пользователя с инструкциями по применению.

Базовая измерительная система не может напрямую применяться для решения измерительных задач. Она является основой для синтеза прикладной измерительной системы [15]. Пример такой системы показан на рис. 2. Здесь для условий низкоскоростного 3G-соединения и задачи подсчета количества круглого лесоматериала синтезирована система, которая на мобильном устройстве выполняет предварительную обработку изображения, а затем передает результат на облачный сервер, где выполняется анализ и измерение (в данном случае – подсчет количества).

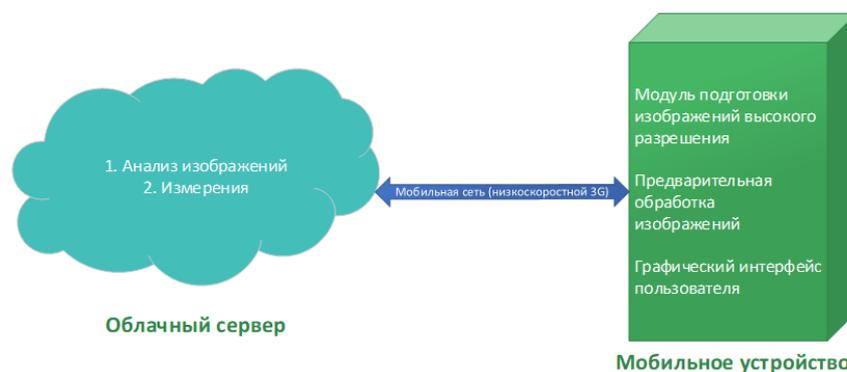


Рис. 2. Структура синтезированной прикладной измерительной системы

Синтез или построение измерительной системы происходит для каждой измерительной задачи, которую инициирует пользователь. Синтез также может выполняться, если по результатам работы модуля оценки качества соединения, который работает на постоянной основе, скорость соединения изменяется более чем на 15 % и это изменение сохраняется более чем на 30 секунд.

Метод построения фотограмметрических измерительных систем. Описав принципиальную структуру базовой и прикладной измерительных систем, перейдем к формулировке метода их построения, основанного на мобильно-облачных вычислениях.

Метод разделяется на два крупных этапа, внутри которых происходит сначала разработка базовой измерительной системы, а затем разработка синтезированных прикладных измерительных систем.

Первый этап: Разработка базовой измерительной системы.

Шаг 1. Определение перечня измерительных задач. На данном шаге требуется принятие решения о том, какие классы измерений может проводить измерительная система. К ним могут относиться: подсчет количества, измерение площади, измерение объема. Каждый класс измерений определяется в контексте объекта измерения – например, лес или металлопрокат.

Шаг 2. Определение методов, применимых для решения каждой измерительной задачи и их программная реализация. Данный этап является самым трудоёмким, поэтому нами была разработана и ранее опубликована онтология методов и комбинаций методов, которая является пополняемой и может лежать в основе любой базовой измерительной системы.

Шаг 3. Исследование влияния Интернет-соединения на качество и скорость получения результатов. На данном этапе требуется определить пороговые значения, которые будут влиять на принятие решения о переносе задачи либо на серверную часть, либо на мобильное устройство. Данная задача решается исходя из определенных минимальных требований к мобильному устройству.

Шаг 4. Программная реализация серверной части и мобильного приложения. В рамках данного этапа разрабатываются программные реализации всех описанных в предыдущем пункте компонентов.

Шаг 5. Предварительное обучение системы. На данном этапе происходит наполнение базы кейсов СВР и выработка продукционных правил. Система в следящем режиме фиксирует действия пользователя-эксперта, формируя на их основе свою базу знаний. Данный шаг, как и шаг 2 является весьма трудоёмким и, по этой причине, также реализован в виде компонента онтологии методов и их комбинаций. При создании реальных версий базовых измерительных систем за основу будет браться полученная нами ранее онтология, что потребует от разработчиков только её дополнения и уточнения с учетом выбранных классов измерительных задач.

Второй этап: Синтез прикладной измерительной системы

Шаг 1. Определение характеристик Интернет-соединения. Если Интернет-соединение устойчиво и его скорость не ниже соответствующей стандарту 2G/EDGE дальнейший процесс синтеза осуществляется облачным сервером. Если параметры соединения ниже или оно отсутствует, дальнейшее конфигурирование осуществляется мобильным устройством.

Дальнейшие шаги будем рассматривать для двух случаев (отсутствующего или приемлемого качества Интернет-соединения.) В первом случае каждый шаг обозначим буквой (a), во втором – буквой (b).

Шаг 2. Определение перечня методов и их комбинаций исходя из измерительной задачи. На основании выбранной пользователем задачи, которые может выполнять базовая измерительная система, определяется полный цикл обработки и анализа изображений. (a) Мобильное устройство осуществляет поиск наиболее релевантного варианта в наборе предопределенных конфигураций измерительной системы. (b) Облачный сервер осуществляет выборку из базы знаний с целью определения подходящей комбинации методов.

Шаг 3. Выбор конфигурации имплементации измерительной системы. (a) Мобильное устройство выполняет инициализацию выбранных методов из локальной копии. (b) Облачный сервер, основываясь на оценках качества соединения, полученных от мобильного устройства и от собственного модуля, осуществляет вычисления на основе продукционных правил, в результате чего определяется место имплементации методов предварительной обработки, анализа изображений и методов измерения.

Шаг 4. Мониторинг устойчивости соединения. В случае изменения характеристик канала связи более чем на 15% и сохранения этого изменения в течение более чем 30 секунд измерительная система по окончании очередного расчета переходит на шаг 3 и выполняет заново выбор конфигурации имплементации измерительной системы.

Заключение. Представленный в данной статье метод построения фотограмметрических измерительных систем на основе мобильных облачных вычислений предлагает принципиально иной подход к решению задачи. Во-первых, известные на сегодняшний день методы мобильно-облачных систем общего назначения предполагают разработку сразу конкретных решений, что в условиях неустойчивого Интернет-соединения, динамики развития и появления новых методов делает их не гибкими и затрудняет их совершенствование. Во-вторых, известные на сегодняшний день методы построения измерительных систем на основе фотограмметрии сводятся к разработке автономных решений, мобильность которых ввиду использования сложных программных и аппаратных компонентов, является крайне низкой. В отличие от этого нами предложен подход, позволяющий использовать преимущества как облачных вычислений (что даёт нам возможность постоянного совершенствования методов и алгоритмов), так и мобильных устройств (что снижает требования к пользователям и существенно повышает мобильность измерительных комплексов). Использование динамической балансировки нагрузки позволяет нивелировать недостатки мобильно-облачных технологий, связанные с неустойчивостью Интернет-соединения. Предложенный метод не лишен недостатков, однако все они сводятся к необходимости основательной подготовки в части формирования базы знаний системы и выработке продукционных правил.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Samoylov A., Borodyansky Y., Kostyuk A., Polovko I.* Mobile-cloud data processing system on digital images // IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN). – 2019. – P. 1674-1678. – DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972161.
2. *Shvarts D., Tamre M.* Bulk material volume estimation method and system for logistic applications // 9th International Conference of DAAAM Baltic: Industrial Engineering; Tallinn; Estonia. – 2014. – P. 289-294.
3. *Knyaz V.A., Maksimov A.A.* Photogrammetric technique for timber stack volume control // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; Zurich; Switzerland. – 2014. – Vol. 40. – P. 157-162.
4. *Круглов А.В., Круглов В.Н., Чирышев Ю.В.* Способ измерения кубатуры круглого леса // Патент России №2553714. 2015. Бюл. № 17.
5. *Madeira S., Gonçalves J., Basto L.* Photogrammetric mapping and measuring application using MATLAB // Comput. Geosci. – 2010. – Vol. 36, No. 6. – P. 699-706.
6. *Song C., Yang B., Zhang, L. et al.* A handheld device for measuring the diameter at breast height of individual trees using laser ranging and deep-learning based image recognition // Plant Methods. – 2021. – Vol 17, No. 67. – <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00748-z>.
7. *Niwa H., Imai Y., Kamada M.* The effectiveness of a method that uses stabilized cameras and photogrammetry to survey the size and distribution of individual trees in a mangrove forest // Journal of Forest Research. – 2021. – No. 0 (0). – P. 1-7. – DOI: 10.1080/13416979.2021.1902069.
8. *Jin Y., Yu K.* A review of optics-based methods for thickness and surface characterization of two-dimensional materials // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – No. 39 (54). – P. 393001. – DOI:10.1088/1361-6463/ac0f1f.
9. *Dinh H.T., Lee C., Niyato D., Wang P.* A survey of mobile cloud computing: Architecture, applications, and approaches // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2013. – No. 18 (13). – DOI:10.1002/wcm.1203.
10. *Roy P., Sarker S., Razzaque M.A., Mamun-or-Rashid M., Hassan M.M., Fortino G.* Distributed task allocation in Mobile Device Cloud exploiting federated learning and subjective logic // Journal of Systems Architecture. – 2021. – Vol. (113). – P. 101972. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2020.101972>.
11. *Thieling L.* Embedded image processing system for cloud-based applications // IWSSIP 2014 Proceedings. – 2014. – P. 163-166.
12. *Yan Y., Huang L.* Large-Scale Image Processing Research Cloud // CLOUD Comput. – 2014, Fifth Int. – 2014. – P. 88-93.
13. *Кучеров С.А.* Конфигурируемые пользователем информационные системы как средство преодоления семантического разрыва // Информатизация и связь. – 2013. – № 5. – С. 135-137.

14. Aniorte P. A distributed adaptable software architecture derived from a component model // *Computer Standards & Interfaces*. – 2003. – No. 3 (25). – P. 275-282. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S0920-5489\(02\)00099-5](https://doi.org/10.1016/S0920-5489(02)00099-5).
15. Buschmann F., Meunier R., Rohnert H., Sommerlad P., Stall M. *Pattern-Oriented Software Architecture*, Vol. 1, A System of Patterns // Wiley, August 1996. – ISBN 978-0-471-95869-7.
16. Walker G. The Basics of Cloud Computing. – <http://docshare01.docshare.tips/files/16621/166213264.pdf> (дата обращения: 20.08.2021).
17. Clouard R., Renouf A., & Revenu M. An ontology-based model for representing image processing application objectives // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. – 2010. – Vol. 24, No. 08. – P. 1181-1208.
18. Filali J., Zghal H.B., Martinet J. Ontology-Based Image Classification and Annotation // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. – 2020. – No. 11 (34). – DOI: 10.1142/S0218001420400029.
19. Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches // *Artificial Intelligence Communications*. – 1994. – No. 7. – P. 39-52.
20. Puzstová L., Babič F., Paralič J. Semi-Automatic Adaptation of Diagnostic Rules in the Case-Based Reasoning Process // *Applied Sciences*. – 2021. – No. 1 (11). – DOI: 10.3390/app11010292.

REFERENCES

1. Samoylov A., Borodyansky Y., Kostyuk A., Polovko I. Mobile-cloud data processing system on digital images, *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2019, pp. 1674-1678. DOI: 10.1109/INDIN41052.2019.8972161.
2. Shvarts D., Tamre M. Bulk material volume estimation method and system for logistic applications, *9th International Conference of DAAAM Baltic: Industrial Engineering; Tallinn; Estonia*, 2014, pp. 289-294.
3. Knyaz V.A., Maksimov A.A. Photogrammetric technique for timber stack volume control, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; Zurich; Switzerland*, 2014, Vol. 40, pp. 157-162.
4. Kruglov A.V., Kruglov V.N., Chiryshv Yu.V. Sposob izmereniya kubatury kruglogo lesa [Method for measuring the volume of roundwood]. Patent of the Russian Federation No. 2553714. 2015. Bull. No. 17.
5. Madeira S., Gonçalves J., Basto L. Photogrammetric mapping and measuring application using MATLAB, *Comput. Geosci.*, 2010, Vol. 36, No. 6, pp. 699-706.
6. Song C., Yang B., Zhang, L. et al. A handheld device for measuring the diameter at breast height of individual trees using laser ranging and deep-learning based image recognition, *Plant Methods*, 2021, Vol 17, No. 67. Available at: <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00748-z>.
7. Niwa H., Imai Y., Kamada M. The effectiveness of a method that uses stabilized cameras and photogrammetry to survey the size and distribution of individual trees in a mangrove forest, *Journal of Forest Research*, 2021, No. 0 (0), pp. 1-7. DOI: 10.1080/13416979.2021.1902069.
8. Jin Y., Yu K. A review of optics-based methods for thickness and surface characterization of two-dimensional materials, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, No. 39 (54), pp. 393001. DOI: 10.1088/1361-6463/ac0f1f.
9. Dinh H.T., Lee C., Niyato D., Wang P. A survey of mobile cloud computing: Architecture, applications, and approaches, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2013, No. 18 (13). DOI: 10.1002/wcm.1203.
10. Roy P., Sarker S., Razzaque M.A., Mamun-or-Rashid M., Hassan M.M., Fortino G. Distributed task allocation in Mobile Device Cloud exploiting federated learning and subjective logic, *Journal of Systems Architecture*, 2021, Vol. (113), pp. 101972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2020.101972>.
11. Thieling L. Embedded image processing system for cloud-based applications, *IWSSIP 2014 Proceedings*, 2014, pp. 163-166.
12. Yan Y., Huang L. Large-Scale Image Processing Research Cloud, *CLOUD Comput.*, 2014, Fifth Int., 2014, pp. 88-93.
13. Kucherov S.A. Konfiguriruemye pol'zovatelem informatsionnye sistemy kak sredstvo preodoleniya semanticheskogo razryva [Configurable by the user information systems as a means of overcoming the semantic gap], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2013, No. 5, pp. 135-137.

14. Aniorte P. A distributed adaptable software architecture derived from a component model, *Computer Standards & Interfaces*, 2003, No. 3 (25), pp. 275–282. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0920-5489\(02\)00099-5](https://doi.org/10.1016/S0920-5489(02)00099-5).
15. Buschmann F., Meunier R., Rohnert H., Sommerlad P., Stall M. Pattern-Oriented Software Architecture, Vol. 1, A System of Patterns, Wiley, August 1996. ISBN 978-0-471-95869-7.
16. Walker G. The Basics of Cloud Computing. Available at: <http://docshare01.docshare.tips/files/16621/166213264.pdf> (accessed 20 August 2021).
17. Clouard R., Renouf A., & Revenu M. An ontology-based model for representing image processing application objectives, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2010, Vol. 24, No. 08, pp. 1181-1208.
18. Filali J., Zghal H.B., Martinet J. Ontology-Based Image Classification and Annotation, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2020, No. 11 (34). DOI: 10.1142/S0218001420400029.
19. Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches, *Artificial Intelligence Communications*, 1994, No. 7, pp. 39-52.
20. Pustová L., Babič F., Paralič J. Semi-Automatic Adaptation of Diagnostic Rules in the Case-Based Reasoning Process, *Applied Sciences*, 2021, No. 1 (11). DOI: 10.3390/app11010292.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.К. Лебедев.

Самойлов Алексей Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: asamoylov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; зав. кафедрой.

Бородянский Юрий Михайлович – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: borodyanskyum@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123260889; кафедра безопасности информационных систем; к.т.н.; зав. кафедрой.

Samoylov Alexey Nikolaevich – Southern Federal University; e-mail: asamoylov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; head of department.

Borodyansky Yury Mikhailovich – Federal State Budget-Financed Educational Institution of Higher Education The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications; e-mail: borodyanskyum@gmail.com; St. Petersburg, Russia; phone: +78123260889; the department of information systems security; cand. of eng. sc.; head of department.

УДК 004.891.2

DOI 10.18522/2311-3103-2021-4-174-187

А.Н. Целых, В.С. Васильев, Л.А. Целых

АЛГОРИТМ РЕКОНСТРУКЦИИ МАТРИЦЫ СМЕЖНОСТИ ПРИЧИННЫХ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ОТСУТСТВИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ*

Рассматривается проблема моделирования сложных систем при отсутствии наблюдаемых переменных. Для решения этой проблемы предлагается использовать причинные графовые модели. Класс причинных моделей, который мы здесь рассматриваем, определяется как нестохастические причинные модели с ненаблюдаемыми переменными. Эти модели представляются в виде направленного графа, создаваемого на основе человеческих ментальных репрезентаций. При этом на дугах причинность выражена в виде некоторых меток, которые имеют знак, определяющий направление изменений состояния системы. Рассматриваемые причинные модели включают неоднородные, сложные и качественные

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда фундаментальных исследований № 19-01-00109.