

Сервис распределенной обработки информации для визуальной калибровки узлов многозвенного манипулятора

А.А. Горбенко, А.А. Лутов, М.Л. Морнев, В.Ю. Попов

*Уральский государственный университет им. А.М.Горького
gorbenko.ann@gmail.com, alutov@naumen.ru, max.mornev@gmail.com,
Vladimir.Popov@usu.ru*

Точность воспроизведения команд, поступающих на контроллер, является одной из ключевых характеристик эффективности робототехнического устройства. Обычно решению этой задачи большое внимание уделяется при запуске робототехнического комплекса в эксплуатацию. Однако все робототехнические узлы, в большей или меньшей степени, склонны к разрегулировке в процессе эксплуатации. Поэтому периодическая дополнительная калибровка является стандартной задачей при регулярном использовании роботов. На сегодняшний день имеется довольно большое количество моделей, описывающих различные факторы функционирования шаговых двигателей. В частности, математические модели магнитных шаговых двигателей [1]; описания неполадок шаговых двигателей [2]; вибрации [3]; динамических характеристик [4]; резонанса [5], [6]. Некоторые другие аспекты эксплуатации шаговых двигателей исследовались, например, в работах [7] – [10]. Тем не менее, осуществление калибровки на основе физической модели функционирования робота представляется весьма затруднительным, поскольку при построении комплексной модели необходимо учитывать слишком большое количество разнородных факторов. Даже начальная калибровка робототехнических комплексов требует значительных усилий (см., например, [11] – [13]). Однако массовое внедрение роботов требует нахождения эффективных решений для периодической дополнительной калибровки, не налагающих существенных ограничений на техническую оснащенность робота и места осуществления калибровки. Особенно важным это представляется для активно развивающегося в мире направления сервисной робототехники, для которой характерны массовое использование, низкая цена изделия, применение простых конструктивных решений и эксплуатация в бытовых условиях. Наиболее интересным с практической точки зрения представляется подход, основанный на визуальной калибровке. Визуальные сенсоры – типичный элемент оснащения сервисных роботов. Соответственно, вообще говоря, система не требует дополнительных затрат и использования специально оборудованных полигонов. Даже если робототехническая система не имеет собственных визуальных сенсоров, пригодных для калибровки, стоимость соответствующего оборудования и его установки незначительны. Более того, возможно осуществление калибровки одного робота другим, а в некоторых случаях – и самокалибровки.

Нами рассматривается задача визуальной калибровки для многозвенного манипулятора сервисного робота. Кроме стандартных преимуществ визуальной калибровки для сервисных роботов, в случае манипулятора можно отметить также то, что большинство сервисных роботов, оснащенных манипуляторами, обладает штатной видеокамерой, имеющей хороший обзор манипулятора. Соответственно, сам робот может принимать участие в процессе калибровки, а в идеале, полностью брать этот процесс на себя.

В идеале, конечной целью калибровки является такая модель манипулятора, в соответствие с которой он точно приходит в любое возможное положение, не запрещенное его механикой. Однако даже для простейших трехзвенных манипуляторов с захватами таких положений может быть слишком много. Даже самые дешевые сервоприводы способны занимать порядка 1000 промежуточных положений. Соответственно,

трехзвенный манипулятор на основе таких сервоприводов может принимать порядка 1 000 000 000 000 промежуточных положений. Кроме того, на поведение манипулятора влияет захваченный им груз. Соответственно, возникает такой параметр, как набор возможных грузов, что еще больше увеличивает число промежуточных положений. Наконец, точность перехода в то или иное состояние зависит от начального состояния и последовательности промежуточных состояний. Тестирование всех этих положений не может быть проведено за разумное время. Значит, требуется создание выборки ключевых положений, такой, что выполнение всех тестов, входящих в эту выборку, гарантирует, с разумной вероятностью, корректную работу манипулятора. Помимо собственно калибровки, эта выборка может быть использована роботом для самотестирования в процессе штатного функционирования. Результатом самотестирования будет набор наиболее проблемных ключевых положений. При последующей калибровке можно будет сосредоточиться на этих положениях, сократив, таким образом, время технического обслуживания робота. Подбор ключевых положений можно осуществлять на основе информации о положениях, занимаемых в процессе штатного функционирования робота. Эта информация существенно зависит от окружения, в котором работает робот. Соответственно, мы можем выполнять калибровку робота для конкретного рабочего окружения, что потенциально позволит сократить размер выборки и улучшить поведение робота в этом окружении. Для реализации такого способа выборки естественным образом приспособлены интеллектуальные алгоритмы, вырабатывающие критерии важности некоторого положения на основе того, как часто оно встречается в процессе штатной работы, насколько критична точность перемещения в это положения для выполнения типичных задач, и на основе других возможных свойств положения.

Алгоритм создания выборки ключевых положений должен учитывать такую важную особенность процесса калибровки на основе визуальной информации, как невозможность достижения высокой точности измерения положения манипулятора. Действительно, если камера статична, то, в некоторых положениях, одни детали манипулятора будут неизбежно заслонять другие, соответственно, точность определения положения некоторых деталей резко снижается. Также, серьезное влияние оказывают неустраняемые артефакты, возникающие на изображении в силу использования видеокамерой аппаратного алгоритма сжатия или в силу недостатков ее конструкции. Наконец, разрешающая способность камеры очевидным образом оказывает влияние на точность измерений. В такой ситуации в качестве критерия прохождения теста можно использовать способность манипулятора стабильно занимать положение, близкое к ключевому. Дополнительным критерием может служить минимизация ошибки модели, т. е. невозможность уменьшить ошибку дальнейшим изменением калибруемых параметров.

Рассмотрим некоторые возможные способы калибровки. Простое перемещение манипулятора из начального положения в некоторое ключевое положение с последующим возвратом не позволяет учесть некоторые особенности работы манипулятора. А именно, команда, которую требуется подать на контроллер сервоприводов для перемещения манипулятора из положения А в положение В, может зависеть как от А, так и от В. Например, чтобы переместиться из А в В, нам требуется перевести сервопривод в положение 75, а чтобы переместиться из С в то же самое положение В, нам может потребоваться перевод того же сервопривода в положение 70. Такое явление вызвано электромеханическими особенностями работы сервоприводов. Чтобы постараться учесть эту особенность и выработать наилучшую в среднем команду, можно для каждого ключевого положения выбрать набор окружающих положений, после чего попробовать переместить манипулятор из каждого окружающего в ключевое положение, и зафиксировать результат. Также, подобный способ проверки позволяет выявить наличие колебательных элементов в конструкции манипулятора, поскольку последователь-

ность действий при калибровке ключевого положения может приводить к их раскачиванию.

Следует отметить, что существует способ калибровки, который позволяет сгладить влияние колебаний на процесс калибровки посредством некоторого ограничения функциональности манипулятора. Способ состоит в проверке способности манипулятора перемещать груз. Если груз представляет собой, например, куб, то, отпущенный манипулятором, он достаточно быстро займет фиксированное положение, соответствующее наименьшему уровню потенциальной энергии. В то же время, колебания в манипуляторе могут затухать достаточно медленно. Таким образом, мы имеем способ получения фиксированного положения калибруемого объекта за разумное время. Это должно приводить к большей устойчивости результатов калибровки.

Для первоначальной настройки интеллектуальных алгоритмов в решаемой задаче используется специализированный робототехнический стенд. Стенд состоит из стационарного манипулятора, внешней камеры и соответствующего компьютерного оборудования. Изображения с камеры, вместе с данными, описывающими ожидаемое положение манипулятора, отправляются в хранилище. Из него данные могут быть извлечены вычислительным комплексом, выполняющим калибровку в режиме off-line. Непосредственно на стенде в режиме реального времени функционирует вычислительный комплекс, непосредственно отдающий команды контроллеру манипулятора, осуществляющий первоначальную обработку визуальной информации и передающий информацию на хранение. Первоначальная обработка информации необходима для предотвращения аварийных ситуаций. Задания для этого вычислительного комплекса, а именно, выборки ключевых положений, формируются другим вычислительным комплексом на основе накопленных опытных данных.

Визуальная калибровка многозвенного манипулятора включает в себя решение двух главных задач. В первую очередь это задача распознавания и выделения на изображениях ключевых точек на манипуляторе. Далее выполняется анализ полученных сведений и исследование статистики работы механизмов.

Распознавание изображений происходит в порядке следования кадров. Система распознавания состоит из двух последовательно работающих нейросетевых модулей.

Первый модуль включает обработку исходного изображения, направленную на первоначальное распознавание ключевых точек манипулятора, классифицирующей нейронной сетью с массовым параллелизмом архитектуры (более 2 000 независимых потоков на типичном растре). Одновременно с предварительной классификацией осуществляется сжатие потока информации (от 81 до 108 раз в типичном случае). Работа с классифицирующей нейронной сетью осуществляется при помощи программного комплекса поддержки интеллектуальных вычислений GANS [14].

На следующем этапе сжатый растр обрабатывается рекуррентной нейронной сетью для подавления шума, внесенного на этапе предварительной классификации. Для повышения вычислительной эффективности рекуррентная нейронная сеть реализована непосредственно. В результате обработки рекуррентной сетью мы получаем растр с распознанными облаками точек, соответствующих ключевым элементам манипулятора.

Получаемые облака точек, вообще говоря, не позволяют по одиночному растру определить точность достижения фиксированного состояния. Однако они предоставляют достаточную информацию для эффективного мониторинга перехода из одного состояния в другое. При этом есть даже возможность регистрировать такие тонкие нюансы функционирования манипулятора, как возникновение противохода. Вычисление точности достижения фиксированного состояния возможно по последовательному выходу из состояния и возвращению обратно.

Для уменьшения вычислительных затрат на этапе распознавания, связанных с подавлением артефактов сжатия, естественно хранить изображения в форматах без потери качества. Но, поскольку изображения реальных объектов в несколько раз хуже сжимаются без потерь, чем с потерями, объем получаемой визуальной информации весьма значителен: до 40 Гбайт в час по одному калибровочному каналу. При этом для обработки информации, получаемой с одного калибровочного канала при пиковой нагрузке, сервису визуальной калибровки необходимо порядка 120 вычислительных узлов. Соответственно, необходимо использовать емкое хранилище данных, допускающее быстрое чтение и быструю запись. Количество изображений также достаточно велико. Но все они, вообще говоря, могут быть обработаны независимо друг от друга. Соответственно, задачи их обработки можно распределить на многопроцессорный вычислительный комплекс. Поскольку задачи не взаимодействуют друг с другом, коэффициент ускорения будет прямо определяться пропускной способностью канала от многопроцессорного вычислителя до хранилища и временем, требуемым для решения одного экземпляра калибровочной задачи.

Сервисные роботы массового использования могут значительно выиграть от применения централизованных многопроцессорных вычислительных комплексов. Поскольку робот нуждается в калибровке только периодически, при использовании локальных вычислительных мощностей для калибровки потребуется дорогостоящий вычислительный блок, возможность эффективного применения которого весьма сомнительна. В то же время, использование центрального вычислительного комплекса для массового обслуживания калибруемых роботов позволяет эту неравномерность существенно сгладить. Кроме того, централизованный вычислительный комплекс естественным образом собирает обширную базу экспериментальных данных, полученную в результате использования большого количества роботов. Такая база данных может использоваться как для разработки роботов нового поколения, так и для оперативного анализа недостатков имеющихся роботов, и прозрачного, для пользователей, их устранения.

Впрочем, вычислительный комплекс для массовой калибровки роботов может быть и гетерогенным и распределенным, включающим в себя как домашние компьютеры пользователей роботов, так и бортовые компьютеры роботов. Частичная обработка данных на домашнем компьютере пользователя может привести к сокращению объема информации, пересылаемого между пользователем робота и центром, и, как следствие, к снижению нагрузки на магистральные каналы передачи данных. Кроме того, отправка всей возможной информации, собранной роботом, может быть недопустима по соображениям приватности. Соответственно, некоторые данные должны быть обработаны еще до отправки в центр, чтобы исключить возможность утечки чувствительной информации. Таким образом, возникновение большого рынка сервисных роботов открывает широкие перспективы как для применения традиционных многопроцессорных вычислительных комплексов, так и для GRID-систем и систем cloud computing.

Литература

1. D. J. Robinson and C. K. Taft, A Dynamic Analysis of Magnetic Stepping Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol.IECI-16, No.2, pp. 111-125, 1969.
2. C. K. Taft and R. G. Gauthier, Stepping Motor Failure Model. IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol.IECI-22, No.3, pp. 375-385, 1975.
3. T. Egami, K. Shimizu, and K. Abe, Analysis of Vibration Phenomenon of Stepping Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.123-D, No.2, pp. 172-173, 2003.

4. H. Kojima and S. Ikeda, Analysis of Dynamic Characteristics of Stepping Motor System in Consideration of Elasticity of Rotating Shaft. The Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol.104-B, No.4, pp. 225-230, 1987.
5. M. F. Rahman, A. N. Poo, and C. S.Chang, Approaches to Design of Ministepping Step Motor Controllers and Their Accuracy Considerations. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.IE- 32, No.3, pp. 229-233, 1985.
6. M. F. Rahman and A. N. Poo, An Application Oriented Test Procedure for Designing Microstepping Step Motor Controllers. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.IE- 35, No.4, pp. 542- 546, 1988.
7. [http:// www.janome.co.jp/ industrial/ jpn/ products/ desktop robot/ index.html](http://www.janome.co.jp/industrial/jpn/products/desktoprobot/index.html)
8. [http:// www.daihen.co.jp/ products/ advanced/ robot/ robot 30.html](http://www.daihen.co.jp/products/advanced/robot/robot30.html)
9. H. Kojima, S. Ikeda, and T. Tabata, Dynamic Characteristics of Horizontal Two-Link Robot Driven by Step Motors. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.26, No.4, pp. 420-426, 1990.
10. H. Kojima, H. Chigira, Y. Kuwano, K. Abe, and N. Kikuchi, Trajectory Tracking Control and Error Analysis of Three-Link Semiconductor Wafer Transfer Robot Arm Driven by Stepping Motors. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.C- 72, No.719, pp. 2008-2014, 2006.
11. US Patent 4672279 — Robot joint angle detecting system.
12. S. Gunnarsson, M. Norrlof, E. Rahic, M. Ozbek, Iterative learning control of a flexible robot arm using accelerometers. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, Vol.2, pp.1012-1016, 2004.
13. C.-H. Wu, P. N. Koch, Design of robot joint servo development system. 24th IEEE Conference on Decision and Control, Vol.24, pp. 344-349, 1985.
14. Д.О. Конончук, Ю.С. Окуловский. Универсальный пакет поддержки интеллектуальных вычислений GANS. VI Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых. Труды конференции. Выпуск 4. Математическое моделирование и программное обеспечение. Санкт-Петербург: 2009. С. 151-157.