

УДК 681.5

МЕТОДЫ СИЛОМОМЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ В БЕЗОПАСНЫХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.А. Ведяков

Университет ИТМО

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: vedyakov@corp.ifmo.ru

В.С. Громов

Университет ИТМО

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: gromov@corp.ifmo.ru

О.И. Борисов

Университет ИТМО

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: borisov@corp.ifmo.ru

С.А. Колюбин

Университет ИТМО

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49

E-mail: s.kolyubin@corp.ifmo.ru

Ключевые слова: киберфизические системы, силомоментное управление, динамическая модель.

Аннотация: Безопасность киберфизических систем должна обеспечиваться в том числе в их физическом взаимодействии с окружающей средой и, в первую очередь, с человеком. Для этого требуется решить задачу силомоментного управления и оцувствления. Основные методы можно разделить на два класса: с использованием силомоментных датчиков и бездатчиковые подходы. Оценивание внешних сил и моментов по измерениям электрических сигналов на двигателях, положениям, скоростям и ускорениям звеньев продолжает оставаться актуальной областью исследования. В работе рассматриваются последние результаты в этой области и результаты экспериментального исследования на манипуляторах kuka youBot и UR10.

1. Введение

С позиции автоматического управления безопасность киберфизических систем должна обеспечиваться в их физическом взаимодействии с окружающей средой и,

в первую очередь, с человеком. С одной стороны, для выполнения многих операций исполнительные механизмы должны обладать существенной мощностью, с другой стороны, это делает возможным нанесение серьезного ущерба. С развитием киберфизических систем и их интеграции как в промышленность, так и в человеческий быт, актуальность проблемы обеспечения безопасности взаимодействия лишь возрастает.

Для обеспечения безопасности такого взаимодействия требуется решить задачу силомоментного управления и, в частности, оцувствления робототехнической системы. Используемые методы можно разделить на два класса: на основе измерений сил и моментов с помощью датчиков, и на основе оценивания сил и моментов по измерениям положений, скоростей звеньев манипулятора и электрических сигналов на исполнительных механизмах.

Для обеспечения безопасного взаимодействия система управления должна получать оценки внешних сил и моментов для каждого звена непосредственно на рабочем органе робота-манипулятора. Эти оценки также могут производиться с помощью измерительных устройств, например, разрабатывается специальное сенсорное покрытие [1]. Однако, на текущий момент такая система является дорогостоящей и вряд ли может применяться в промышленных масштабах. Другим вариантом является расчет на основе динамической модели робототехнической системы, позволяющей отделить влияние внешней нагрузки от развиваемых исполнительными приводами моментов для обеспечения желаемого движения манипулятора. Кроме того, даже при использовании измерительных систем оценивание сил и моментов по косвенным измерениям увеличивает безопасность киберфизической системы, так как позволяет верифицировать показания датчика и определять его неисправность.

Таким образом, для обеспечения безопасной работы киберфизической системы актуальной задачей является бездатчиковое силомоментное оцувствление, позволяющее оценивать внешние силы и моменты, контролировать создаваемые усилия и, в случае опасности для окружающих, аварийно останавливать работу.

2. Задача динамической калибровки

Динамика n -звенного манипулятора последовательной кинематики с абсолютно упругими звеньями и сочленениями и исполнительными приводами, имеющими существенные передаточные числа, может быть с достаточной точностью описана в следующем виде [2]:

$$(1) \quad \tau_l = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_{fl},$$

$$(2) \quad \tau = I_a\ddot{q} + \tau_l + \tau_{fm},$$

где q , \dot{q} , \ddot{q} — векторы обобщенных координат, скоростей и ускорений, τ и τ_l — обобщенные моменты сочленений и приводов, $M(q)$ — матрица инерции, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ — вектор кориолисовых и центробежных сил, $G(q)$ — вектор гравитации, I_a — матрица инерции двигателей (включая редукторы), τ_{fl} и τ_{fm} — моменты сил трения в сочленениях и на приводах. Последние обычно рассматриваются, как сумма сухого и вязкого трения.

Модель (1)–(2) можно свести к регрессионной форме [3],

$$(3) \quad \tau t = \omega(q, \dot{q}, \ddot{q})\chi,$$

где матрица неизвестных параметров

$$(4) \quad \chi = [\chi_1 \ \chi_2 \ \dots \ \chi_n]^\top, \\ \chi_j = [XX_j, XY_j, XZ_j, YY_j, YZ_j, ZZ_j,$$

$$(5) \quad MX_j, MY_j, MZ_j, M_j, I_{aj}, F_{vl,j}, F_{cl,j}, d_{l,j}, F_{vm,j}, F_{cm,j}, d_{m,j}]^\top,$$

$j = \overline{1, n}$ — порядковый номер звена манипулятора; $XX_j, XY_j, XZ_j, YY_j, YZ_j, ZZ_j$ — элементы тензора инерции j -го звена; MX_j, MY_j, MZ_j — вектора первых моментов звена относительно кинематической системы координат соответствующего звена; M_j — масса j -го звена; $F_{vl,j}, F_{cl,j}, F_{vm,j}, F_{cm,j}$ — диагональные матрицы постоянных коэффициентов сухого и вязкого трения в приводах и сочленениях соответственно; $d_{l,j}, d_{m,j}$ — постоянные коэффициенты, учитывающие асимметричность сил трения.

Матрица χ имеет в рассматриваемом случае размерность $17 \times n$. Однако, некоторые параметры не оказывают влияния на динамику системы или входят в регрессионную модель только в комбинациях с другими. Такие параметры не могут быть идентифицированы и должны быть исключены.

Таким образом, задача состоит в нахождении редуцированного вектора динамических параметров и его идентификации. Это позволит оценить моменты в сочленениях развиваемых для обеспечения желаемого движения манипулятора (без нагрузки) и по их разнице с измеренными выделить влияние внешних сил и моментов.

Моменты, развиваемые приводами, зачастую не измеряются, но могут с достаточной степенью точности быть оценены. Так момент, развиваемый синхронным двигателем с постоянными магнитами, пропорционален току в системе координат, связанной с ротором [4].

3. Идентификация статической модели

Частным случаем динамической калибровки, является идентификация статической модели. При равенстве нулю скоростей и ускорений на манипуляторе без нагрузки моменты, которые должен компенсировать привод для сохранения заданного положения, создаются только трением и гравитацией. Для идентификации требуется измерить или оценить моменты в сочленениях для различных статичных конфигураций робота-манипулятора.

Эксперименты по идентификации статической модели проводились на роботоманипуляторе KUKA youBot. Первое звено манипулятора вращается вокруг вертикальной оси, а для пятого можно считать, что его центр масс находится на оси вращения. Для идентификации гравитационной компоненты и трения были сформированы регрессионные модели для второго, третьего и четвертого сочленений. Редуцирование и поиск базовых параметров осуществлялся аналитически. После этой процедуры количество оцениваемых параметров составило восемь, шесть и четыре для второго, третьего и четвертого звеньев соответственно.

На основе измерений обобщенных координат, оценок моментов на сочленениях, предоставляемых программным обеспечением манипулятора, в 520 случайных точках в операционном пространстве была проведена идентификация неизвестных параметров. На рис. 1 переставлены графики измеренных значений и оценок моментов

на втором сочленении. На рис. 2 изображена абсолютная ошибка оценивания для того же сочленения.

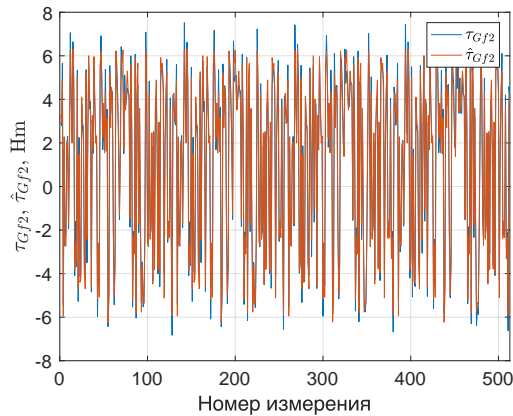


Рис. 1. Графики измеренных значений и оценки момента на втором сочленении

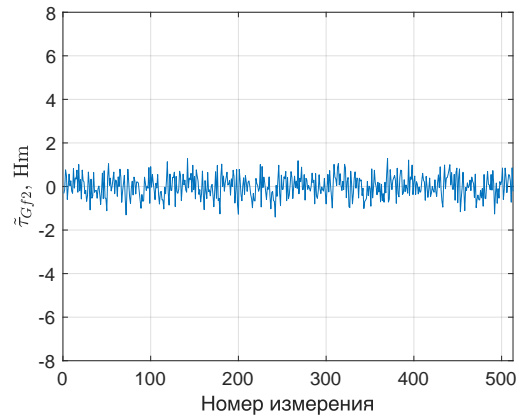


Рис. 2. График ошибки оценивания момента на втором сочленении

В MATLAB Simulink была написана программа для оценки сил и моментов на сочленениях, внешних сил и моментов на инструменте робота-манипулятора и их визуализации. Один из проведенных экспериментов состоял в оценке сил и моментов, создаваемых массой 0,4 кг, расположенным на схвате. На рис. 3 представлен пример визуализации проекций силы: F_x (красная линия), F_y (зеленая) и F_z (синяя) в точке приложения силы относительно манипулятора. В этом эксперименте: $q = [0, 0, -0, 7, 1, 3, 1, 0, 0, 0]$, измеренные моменты в сочленениях $\tau_{el} = [0, 0125, 0, 6176, 3, 2003, 1, 9206, -0, 1888]$ Нм. Полученные оценки: проекций внешней силы на инструменте $F = [0, 5037, 0, -4, 4382]$ Н, моментов $M = [0, 6, 627, 0]$ Нм.

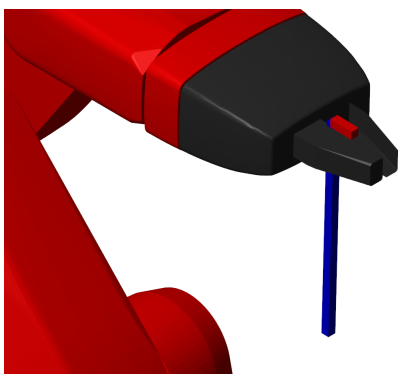


Рис. 3. Пример визуализации проекций внешней силы для KUKA youBot

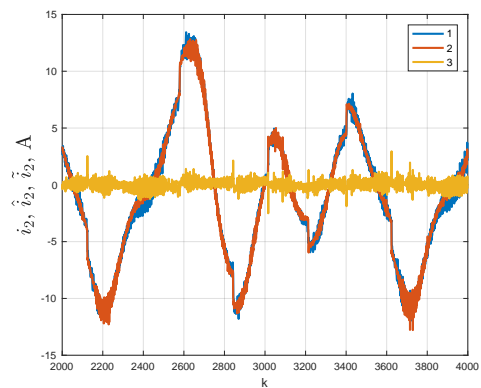


Рис. 4. Результаты идентификации модели для второго сочленения UR10

4. Идентификация динамической модели

Для идентификации динамической модели требуется спланировать траектории для робота-манипулятора в операционном пространстве. С одной стороны, они должны охватывать все операционное пространство, весь диапазон рабочих скоростей и ускорений. С другой стороны, требуется исключить столкновения звеньев манипулятора друг с другом и с окружением. Существует несколько подходов к генерации траектории для динамической калибровки, которые более подробно разобраны в [2].

Эксперименты по идентификации динамической модели проводились на роботе манипуляторе UR10. Были синтезированы траектории для робота-манипулятора, в среде *rViz* было проверено отсутствие столкновений при движении. Редуцирование модели осуществлялось с помощью *QR*-декомпозиции на основе полученных данных [5]. После этой процедуры количество оцениваемых параметров составило 33, 37, 30, 23, 16, 9 для первого, второго, третьего, четвертого, пятого и шестого звеньев соответственно. Так как программное обеспечение позволяет измерять токи на приводах, а не оценки моментов, то задачей ставилась идентификация параметров модели тока, отличающейся от модели моментов на постоянный множитель. На рис. 4 представлены графики измеренных значений i_2 (линия 1), оценки \hat{i}_2 (линия 2) и ошибки оценивания \tilde{i}_2 (линия 3) тока на втором сочленении от номера измерения k .

5. Заключение

В работе рассматривалась проблема обеспечения безопасного взаимодействия киберфизических систем с окружающей средой и, в первую очередь, с человеком, и, как следствие, задача бездатчикового силомоментного оцувствления. На примерах роботов-манипуляторов *kuca youBot* и UR10 была проведена идентификация динамической модели, на основе которой стало возможным оценить силы и моменты, создаваемые внешней нагрузкой, что позволило контролировать создаваемые усилия и, в случае опасности для окружающих, аварийно останавливать работу.

Список литературы

1. Cirillo A., Ficuciello F., Natale C., Pirozzi S., Villani L. A conformable force/tactile skin for physical human–robot interaction // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2016. Vol. 1, No. 1. P. 41-48.
2. Kolyubin S.A., Shiriaev A.S., Jubien A. Refining dynamics identification for co-bots: Case study on KUKA LWR4+ // *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50, No. 1. P. 14626-14631.
3. Hollerbach J., Khalil W., Gautier M. Model identification // In B. Siciliano and O. Khatib (eds.). *Springer Handbook of Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. P. 321–344.
4. Hughes A., Drury W. *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. Newnes, 2013.
5. Khalil W., Gautier M. Calculation of the identifiable parameters for robot calibration // *IFAC Proceedings Volumes*. 1991. Vol. 24, No. 3. P/ 687-691.