



Определение параметров физического взаимодействия между роботом и средой с использованием внутренних и внешних сенсоров

Д. И. Попов^а, PhD, научный сотрудник, orcid.org/0000-0001-9341-8083, d.popov@innopolis.ru

^аУниверситет Иннополис, Университетская ул., 1, Иннополис, 420500, РФ

Введение: разработка робототехнической системы, в которой робот и человек безопасно и эффективно решают поставленную задачу, является одним из ключевых вызовов в области индустриальной робототехники. Для такой совместной рабочей ячейки не исключено прямое физическое взаимодействие между роботом, человеком и средой. **Цель:** разработать метод для идентификации параметров физического взаимодействия, включающих в себя силу взаимодействия и точку ее приложения. **Результаты:** предложен аналитический алгоритм расчета параметров взаимодействия с использованием измерений, полученных от внутренних датчиков крутящего момента в шарнирах робота и внешнего сенсора глубины. Алгоритм основан на расширении уравнений статического равновесия, позволяющем найти искомую силу взаимодействия и линию ее действия. Далее это общее решение сочетается с геометрическими ограничениями, описывающими поверхность манипулятора и соответствующий конус трения. Особое внимание уделено сингулярным случаям, возникающим при пересечении линией действия силы взаимодействия одной или нескольких осей датчиков, приводящих к множеству решений. **Практическая значимость:** ключевой особенностью предложенного алгоритма является его аналитический характер, что позволяет существенно сократить время вычислений по сравнению с традиционными подходами, основанными на методах прямой оптимизации. Таким образом, предложенный алгоритм хорошо подходит для реальных промышленных применений, где время отклика имеет решающее значение из соображений безопасности. Кроме того, алгоритм способен оценить искомые параметры даже в некоторых сложных случаях с множеством возможных решений. Существующие методы обычно игнорируют такие случаи. Полученные результаты показали, что идентификация параметров взаимодействия робота и среды с использованием только внешних сенсоров крайне затруднительна, однако внешние сенсоры могут значительно снизить неопределенность результатов, полученных с помощью внутренних сенсоров робота в сингулярных случаях.

Ключевые слова — индустриальные роботы, взаимодействие человека и робота, идентификация параметров физического взаимодействия, силомоментное ощущение.

Для цитирования: Попов Д. И. Определение параметров физического взаимодействия между роботом и средой с использованием внутренних и внешних сенсоров. *Информационно-управляющие системы*, 2023, № 5, с. 2–11. doi:10.31799/1684-8853-2023-5-2-11, EDN: ISTWOV

For citation: Popov D. I. Parameter identification for physical robot-environment interaction using internal and external sensors. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 5, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-5-2-11, EDN: ISTWOV

Введение

Оценка параметров взаимодействия человека и робота является одной из важных тем для исследований в области робототехники и полагается на методы, варьирующиеся от визуальной и акустической обработки до прямых измерений силы с использованием соответствующих датчиков. Хотя большинство из этих методов были предложены несколько десятков лет назад, в последние годы они приобретают все большую популярность благодаря широкому использованию коллаборативных роботов, которые, как правило, оснащены различными датчиками силы/крутящего момента, позволяющими обнаружить взаимодействие робота с оператором или окружающей средой. Этот тип роботов был специально разработан для использования в совместных рабочих ячейках, состоящих из человека и робота, где безопасность человека является приоритетом.

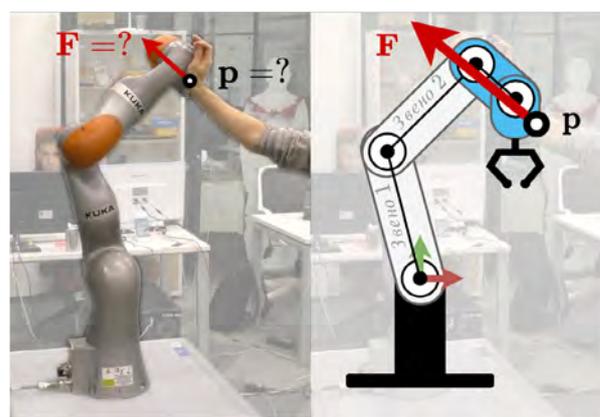
Однако обеспечение безопасности человека по-прежнему остается сложной задачей, поскольку большинство промышленных роботов могут достигать достаточно больших скоростей и сил, которые могут быть опасны для человека при ударе [1, 2]. Хотя в настоящее время существует ряд методов для предотвращения столкновений, иногда физическое взаимодействие человека и робота неизбежно или даже является необходимым элементом производственного процесса. Чтобы обеспечить безопасность на практике, все физические взаимодействия должны быть правильно идентифицированы и отработаны соответствующей реакцией робота, которая может варьироваться от простой аварийной остановки до более сложных сценариев, таких как удаление от препятствия или снижение жесткости шарниров робота [3, 4]. Понятно, что для реализации любого из этих сценариев сила взаимодействия человека и робота должна оцениваться с необхо-

димой скоростью и точностью, что мотивирует разработку специальных методик, представленных в данной статье.

Для определения желаемой силы взаимодействия могут применяться различные методы, начиная от прямых измерений и заканчивая сложными численными алгоритмами. На практике производительность алгоритмов для идентификации параметров взаимодействия зависит от набора доступных датчиков, предоставляющих данные для обнаружения и оценки взаимодействия [5, 6]. Очевидно, что проблема может быть существенно упрощена при правильном выборе датчиков. В настоящее время в коллаборативной робототехнике используется большое разнообразие датчиков, наиболее привлекательными из которых являются тактильные датчики, или так называемая «искусственная кожа» [7–9], которые напрямую определяют как силу взаимодействия, так и точку ее приложения, что делает процесс идентификации тривиальным. Этот тип датчиков может быть основан на различных физических явлениях от магнитных до оптических [10]. Однако большинство из них имеют одни и те же принципиальные недостатки: размер, громоздкость, цена и сложность калибровки, — которые во многом превосходят их преимущества. Другой популярный тип внешнего датчика — камеры и сенсоры глубины [11–14], которые могут быть полезны только для поиска точки взаимодействия при отсутствии окклюзий. Также стоит упомянуть некоторые довольно не типичные датчики, такие как акселерометры или датчики звука, которые также используются для обработки столкновений [15–17].

В данной работе предлагается использовать информацию от внутренних и внешних датчиков робота. Обработывая данные с этих датчиков, можно извлечь желаемую тактильную информацию о взаимодействии человека и робота, которая включает положение точки контакта на поверхности робота, а также амплитуду и направление силы взаимодействия, показанные на рис. 1.

Большинство существующих подходов к оценке параметров взаимодействия человека и робота по внутренним датчикам основаны на минимизации квадратов невязок уравнений статического равновесия с учетом некоторых ограничений, связанных как с формой робота, так и со свойствами контактной поверхности. Например, точка контакта должна быть четко расположена на поверхности звена робота, а направление силы должно быть близко к нормали поверхности. В последние годы было разработано несколько различных методов оценки параметров взаимодействия, основанных либо на прямой нелинейной оптимизации с ограничениями [18, 19], либо



■ **Рис. 1.** Параметры взаимодействия человека и робота: сила взаимодействия (F) и точка ее приложения (p)

■ **Fig. 1.** Parameters of human-robot interaction: interaction force (F) and its application point (p)

на алгоритмах Монте-Карло [20, 21] или других методах [22–24]. В целом эти подходы обеспечивают хорошую точность, но обладают достаточно низкой скоростью вычислений. Последнее обусловлено итерационным характером соответствующих численных алгоритмов, требующих многочисленных оценок целевой функции для поиска параметров взаимодействия. Другие возникающие здесь трудности связаны с неспособностью обрабатывать взаимодействия в сингулярных или близких к сингулярным конфигурациях манипулятора, когда существуют множественные минимумы целевой функции, и, как результат, взаимодействие не может быть идентифицировано однозначно. Таким образом, существующие методы не полностью соответствуют инженерным требованиям, предъявляемым реальной имплементацией.

Постановка задачи

Основная задача, рассматриваемая в данной работе, заключается в оценке силы взаимодействия человека с роботом и точки ее приложения по данным, полученным от внутренних и внешних датчиков. Предполагается, что оператор взаимодействует с последовательным планарным манипулятором с n -степенями свободы, состоящего из неподвижного основания, рабочего органа и ряда звеньев, соединенных с помощью n вращательных шарниров. Кроме того, предполагается, что сила взаимодействия может быть приложена к произвольной точке поверхности звена манипулятора (см. рис. 1). Следует отметить, что здесь мы рассматриваем только точечный контакт между оператором и роботом,

предполагая, что любой контакт поверхность-поверхность (или более сложный) может быть эффективно аппроксимирован взаимодействием точка-точка.

Для этой задачи удобно описать геометрию манипулятора, используя следующие обозначения. Предполагается, что сила взаимодействия приложена к k -му звену, тогда $[x_p, y_p]$ — координаты контакта точки \mathbf{p} в глобальной системе отсчета, $[x_p^k, y_p^k]$ — координаты той же точки в относительной локальной системе (рис. 2). Следует отметить, что приведенная выше модель пригодна для достаточно общего случая, когда сила взаимодействия приложена к любому промежуточному звену манипулятора ($k < n$), не обязательно к его рабочему органу ($k = n$).

В таком описании манипулятора форму k -го звена удобно представить в виде замкнутого контура Ω_k , который состоит из нескольких соединенных отрезков. Это дает следующее геометрическое ограничение:

$$[x_p^k, y_p^k] \in \Omega_k, \quad (1)$$

которое в дальнейшем необходимо рассматривать совместно с геометрической моделью робота. Контур Ω_k для k -го звена описан набором m последовательных узлов отрезков:

$$\Omega_k = \text{hull}(\{s_1^k, \dots, s_m^k\}). \quad (2)$$

Для учета условия статического равновесия, связанного с рассматриваемым взаимодействием, используется основное соотношение $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{p})^T \mathbf{F}$ между силой взаимодействия \mathbf{F} и вектором моментов в шарнирах $\boldsymbol{\tau}$ через якобиан $\mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{p})$, который удобно представить в сокращенном виде

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \dots \\ \tau_k \end{bmatrix} = \mathbf{J}_k(\mathbf{q}^{(k)}, \mathbf{p})^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где используется только k значимых компонентов вектора крутящих моментов в шарнирах $\boldsymbol{\tau}$. Этот индекс k легко найти из исходного вектора крутящих моментов в шарнирах $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_n)$ путем исключения последних нулевых значений, т. е. применяя правило

$$\tau_k \neq 0 \ \& \ \tau_i = 0, \ \forall i > k. \quad (4)$$

Понятно, что на практике это правило следует применять с некоторыми допущениями в зависимости от шума измерений.

В уравнении (3) вектор $\mathbf{q}^{(k)} = (q_1, \dots, q_k)^T$ и вектор крутящего момента $\boldsymbol{\tau}^{(k)} = (\tau_1, \dots, \tau_k)^T$ известны, а сила взаимодействия \mathbf{F} и ее приложение точка \mathbf{p} должны быть найдены. Якобиан $\mathbf{J}_k(\mathbf{q}, \mathbf{p})$ размера $2 \times k$ может быть получен непосредственно из геометрической модели робота, но можно легко доказать, что для рассматриваемой задачи эта матрица может быть представлена в следующем виде:

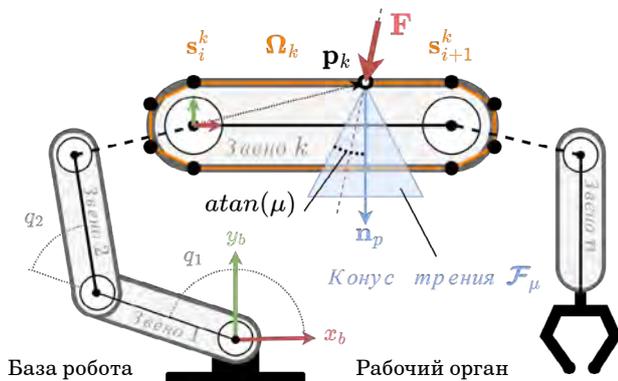
$$\mathbf{J}_k(\mathbf{q}^{(k)}, \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} -(y_p - y_1) & \dots & -(y_p - y_k) \\ (x_p - x_1) & \dots & (x_p - x_k) \end{bmatrix}_{2 \times k}, \quad (5)$$

где (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, k$ определяют расположение осей каждого шарнира.

Другая особенность рассматриваемой задачи, которую необходимо обязательно учитывать, связана с допустимыми направлениями силы взаимодействия \mathbf{F} , которые ограничены физически. На самом деле эта сила состоит из двух основных составляющих: нормальной и касательной, — связанных законом трения. Все геометрически возможные направления можно представить в виде так называемого «конуса трения», который строится вокруг нормали \mathbf{n}_p к поверхности робота в точке контакта \mathbf{p} (см. рис. 2). Предполагая, что коэффициент трения равен μ и \mathbf{n}_p является нормалью, указывающей внутрь звена, можно записать соответствующее ограничение следующим образом:

$$|\angle(\mathbf{n}_p, \mathbf{F})| \leq \text{atan}(\mu). \quad (6)$$

В дальнейшем это ограничение конуса трения будет обозначаться как $\mathbf{F} \in \mathcal{F}_\mu$. Стоит отметить, что в приведенных выше выражениях оба вектора, \mathbf{n}_p и \mathbf{F} , должны быть выражены относительно одной и той же системы координат (локальной или глобальной).



■ **Рис. 2.** Геометрия манипулятора и расположение точки взаимодействия с соответствующим конусом трения

■ **Fig. 2.** Geometry of the manipulator and location of the interaction force application point with the corresponding friction cone

Таким образом, искомое решение (\mathbf{F}, \mathbf{p}) рассматриваемой задачи должно удовлетворять уравнениям статического равновесия (3), а также ограничениям на направление силы $\mathbf{F} \in \mathcal{F}_\mu$ и положение точки контакта $\mathbf{p} \in \Omega_k$. Стоит отметить, что в зависимости от количества уравнений k система уравнений статического равновесия может быть как переопределенной, так и недоопределенной. Кроме того, на практике некоторые компоненты в этих уравнениях могут быть искажены шумом измерений, что может привести к несогласованности уравнений. По этой причине имеет смысл представить рассматриваемую задачу идентификации в виде следующей нелинейной задачи оптимизации с ограничениями:

$$\left\| \boldsymbol{\tau}^{(k)} - \mathbf{J}_k(\mathbf{q}^{(k)}, \mathbf{p})^T \mathbf{F} \right\| \rightarrow \min_{\mathbf{F}, \mathbf{p}}, \quad (7)$$

$$\mathbf{p} \in \Omega_k, \mathbf{F} \in \mathcal{F}_\mu,$$

где индекс k обозначает звено, к которому приложена сила взаимодействия, определяемая с помощью выражений (4).

Понятно, что это специфическая задача нелинейной оптимизации, которая не может быть решена напрямую и требует разработки специальной методики, предложенной в следующих разделах.

Вычисление силы взаимодействия и ее линии действия

Рассмотрим сначала только уравнения статического равновесия, опуская ограничения на неизвестные переменные \mathbf{F}, \mathbf{p} . Это позволяет получить общее решение этих уравнений, которое в дальнейшем будет интегрироваться с ограничениями $\mathbf{p} \in \Omega_k, \mathbf{F} \in \mathcal{F}_\mu$. Искомое решение будет найдено в конечном виде по специально разработанной методике, основанной на предложенном расширении исходной системы и ее последующей редукции.

Прежде чем сосредоточиться на общем решении, давайте сосредоточимся на некоторых важных свойствах рассматриваемой алгебраической системы (3). Стоит отметить, что общее количество уравнений здесь равно k , что зависит от индекса звена, на который действует сила взаимодействия. При этом количество неизвестных всегда равно четырем: они включают компоненты силы (F_x, F_y) и координаты точки контакта (x_p, y_p) . В общем случае, если такая система согласована, она может иметь как одно, так и несколько решений. Однако для нашей конкретной системы однозначное решение невозможно, так как физически точку приложения силы \mathbf{p} мож-

но перемещать вдоль линии действия силы, не нарушая уравнений статического равновесия. Математически это свойство можно сформулировать следующим образом.

Утверждение 1. Если вектор силы \mathbf{F} и точка его приложения \mathbf{p} удовлетворяют уравнениям статического равновесия (3), то множество решений для одних и тех же вектора силы \mathbf{F} и точки приложения \mathbf{p} принадлежит прямой $\mathbf{p}^* = \mathbf{p} + \alpha \mathbf{F}, \forall \alpha \in \mathcal{R}$, которая также удовлетворяет этим уравнениям.

Чтобы найти решение рассматриваемой системы (3) в замкнутом виде, введем расширенную систему уравнений статического равновесия следующего вида:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \dots \\ \tau_k \end{bmatrix} = \mathbf{J}_k^w(\mathbf{q}^{(k)}, \mathbf{p})^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau_z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где вектор неизвестной силы $\mathbf{F} = [F_x, F_y]^T$ заменяется вектором общего взаимодействия $\mathbf{W} = [F_x, F_y, \tau_z]^T$, включающим крутящий момент τ_z , и исходный якобиан $2 \times k$ (5) заменяется расширенной матрицей размера $3 \times k$

$$\mathbf{J}_k^w(\mathbf{q}^{(k)}, \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} -(y_p - y_1) & \dots & -(y_p - y_k) \\ (x_p - x_1) & \dots & (x_p - x_k) \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{3 \times k}. \quad (9)$$

Предположим также, что система (3) согласована и точка приложения силы \mathbf{p} известна. Расширенная система (8) может быть легко решена для \mathbf{W} как

$$\mathbf{W} = \left[\mathbf{J}_k^w(\mathbf{q}^{(k)}, \mathbf{p})^T \right]^+ \boldsymbol{\tau}^{(k)}, \quad (10)$$

где $[\cdot]^+$ обозначает псевдообращение Мура – Пенроуза. Более того, можно доказать, что для любого произвольного \mathbf{p} полученный вектор \mathbf{W} всегда дает нам искомые компоненты силы взаимодействия F_x, F_y из исходной системы (3). Математически этот результат можно сформулировать следующим образом.

Утверждение 2. Если исходная система (3) включает $k \geq 3$ согласованных уравнений статического равновесия и существует некоторая точка \mathbf{p}^* , обеспечивающая полный ранг $\text{rank}(\mathbf{J}_k^w(\mathbf{q}, \mathbf{p}^*)) = 3$ для расширенной системы, то решение расширенной системы (8) $\mathbf{W} = [F_x, F_y, \tau_z]^T$ уникально и дает точный вектор силы F_x, F_y для исходной системы.

Следовательно, приведенное выше утверждение дает нам решение в закрытой форме для

вектора силы взаимодействия \mathbf{F} с использованием произвольной точки \mathbf{p}^0 . Кроме того, это позволяет нам найти линию действия силы \mathcal{L} , которая, очевидно, должна удовлетворять уравнению

$$\tau_z = \Delta y F_x - \Delta x F_y, \quad (11)$$

где $\Delta x = x_p^0 - x_p$; $\Delta y = y_p^0 - y_p$. Последнее дает следующее уравнение линии действия искомой силы:

$$\mathcal{L} = ax_p + by_p + c, \quad (12)$$

где $a = F_y$; $b = -F_x$; $c = F_x x_p^0 - F_y y_p^0 - \tau_z$, F_x , F_y и τ_z получены из (10).

Подводя итог вышеизложенному, следует отметить, что предложенная методика позволяет оценить как силу взаимодействия \mathbf{F} , так и линию ее действия, используя произвольную начальную точку \mathbf{p}^0 , которая может существенно отличаться от реальной точки приложения силы \mathbf{p} . Однако здесь неявно предполагается, что расширенный якобиан \mathbf{J}_k^w полный и его ранг равен трем.

Экспериментальное исследование

Разработанная методика была апробирована в рамках экспериментов по взаимодействию человека и робота с использованием виртуальной модели манипулятора (см. рис. 1). Для простоты эксперимента модель робота была сведена к планарной за счет правильного выбора направления силы, которая была направлена в плоскости планарного робота. Поверхности звеньев данного робота были аппроксимированы контурами, состоящими из 16 сегментов, а коэффициент трения принимался равным $\mu = 0,5$. Сила взаимодействия прикладывалась к поверхностям 3-го или 4-го звена, ее амплитуда составляла около $\|\mathbf{F}\| = 100$ Н, а направление было выбрано из соответствующего конуса трения.

Точность предложенного алгоритма и устойчивость к шуму оценивались посредством применения некоторого шума к измерениям крутящего момента в шарнирах робота. Для каждого уровня шума было проведено 10^4 виртуальных экспериментов, в которых как поза робота, так и точка приложения силы выбирались случайным образом. Шум измерений генерировался с использованием нормального распределения со средним значением 0–2,0 Н·м, что соответствует экспериментальным данным, полученным с реального робота. Соответствующие результаты моделирования представлены в табл. 1. Понятно, что в случае нулевого шума измерения ошибка оценки незначительна и вызвана округлениями

при вычислениях. Однако даже при достаточно реалистичном шуме измерения 0,5 Н·м могут возникнуть некоторые проблемы, когда аналитический алгоритм не может найти пересечение линии действия силы и поверхности звена робота. Количество таких случаев от общего числа представлено в последнем столбце табл. 1. Для нахождения искомого решения в таких частных случаях разумно объединить предложенный аналитический метод, использующий только информацию с внутренних датчиков, с оценкой точки приложения силы на основе внешних сенсоров. В таком случае аналитический алгоритм будет использоваться только для определения силы взаимодействия, тогда как точка ее приложения будет получена с помощью внешних сенсоров. Очевидно, что в таком случае средняя точность идентификации ухудшится, но это позволит получать решения для всех возможных вариантов.

Вычислительная эффективность предложенного метода также оценивалась посредством моделирования, в ходе которого разработанный аналитический метод сравнивался с методом прямой оптимизации, основанным на популярной функции численной оптимизации `fmincon()` из пакета `MatLab`. Время поиска параметров взаимодействия для этих двух методов представлено в табл. 2, где ясно показано существенное преимущество предлагаемого метода, который оказался примерно в 2000 раз быстрее.

Также стоит отметить, что, несмотря на очевидные преимущества, предлагаемая аналитическая методика имеет некоторые ограничения. В частности, для ее использования требуется полный ранг расширенного якобиана, что на практике может нарушаться, если геометриче-

■ **Таблица 1.** Точность определения параметров взаимодействия при различном шуме измерений

■ **Table 1.** Accuracy of interaction parameters estimation for different measurement noise

Уровень шума измерения момента, Н·м	Ошибка определения амплитуды силы, Н	Ошибка определения направления силы, град	Ошибка определения точки приложения силы, мм	Нет решения при использовании внутренних сенсоров, %
0,0	1e-13	8e-14	3e-13	0
0,1	0,41	0,33	0,93	0
0,5	2,08	1,53	4,63	0,51
1,0	4,23	2,89	8,23	6,86
2,0	8,31	5,96	12,42	25,51

■ **Таблица 2.** Сравнение времени вычисления для классического и разработанного метода идентификации

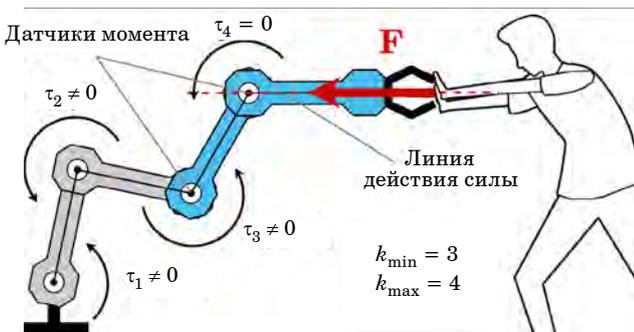
■ **Table 2.** Comparison of computation time for classical and developed identification method

Метод	Время вычисления, мкс		
	min	avg	max
Предложенный аналитический метод	0,19	0,21	0,78
Численная оптимизация fmincon	286	414	1065

ская конфигурация манипулятора близка к сингулярной. Аналогичная трудность возникает, если сила взаимодействия приложена к нижним звеньям с $k < 3$ и система статического равновесия недоопределена.

Оценка индекса звена с взаимодействием в сингулярных случаях

В предыдущем разделе предполагалось, что индекс k взаимодействующего звена известен и однозначно определяется правилом (4). Однако на практике для некоторых отдельных конфигураций робота и некоторых конкретных направлений силы это правило может привести к неверным значениям индекса. Эта ситуация показана на рис. 3, где оператор прикладывает силу к 4-му звену манипулятора, но линия ее действия пересекает ось 4-го шарнира, что приводит к $\tau_4 = 0$. Итак, здесь базовое правило (4) дает индекс звена с взаимодействием $k = 3$ вместо $k = 4$. Следовательно, чтобы это преодолеть, правило для k -индекса должно быть изменено с целью определить возможный диапазон $k \in [k_{min}, k_{max}]$ и рассмотреть все возможные звенья, в которых сила взаимодействия может быть приложена для заданных измерений крутящего момента. В про-



■ **Рис. 3.** Типичный сингулярный случай оценки параметров взаимодействия человека с роботом

■ **Fig. 3.** A typical singular case of human-robot interaction parameters identification

тивном случае существует риск того, что реальное решение не войдет в набор потенциальных.

Чтобы найти диапазон k -индексов для заданных измерений крутящего момента $\tau_i, i = 1..n$, можно применить следующую технику. Во-первых, нижняя граница k -индекса оценивается с использованием базового правила (4). Это дает k_{min} , например $\tau_{k_{min}} \neq 0$ и $\tau_i = 0, \forall i > k_{min}$. Затем путем последовательного увеличения числа рассматриваемых уравнений статического равновесия и проверки согласованности системы (3) получаем верхнюю границу k . Стоит отметить, что тест на согласованность может быть основан на анализе невязок соответствующего решения методом наименьших квадратов рассматриваемой системы. Понятно, что необходимо также определить некоторые допуски для учета шума измерения. Более формально эту методику вычисления диапазона k -индекса можно представить следующим образом:

– нижняя граница

$$k_{min} = \arg \max_i (\|\tau_i\| \geq \delta_\tau); \quad (13.1)$$

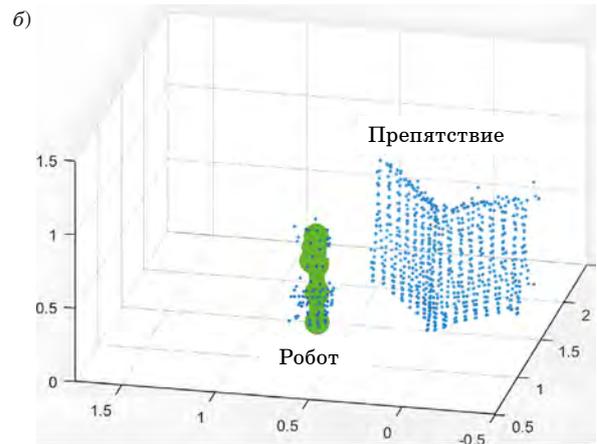
– верхняя граница

$$k_{max} = \arg \max_i \left(\left\| \left(\mathbf{J}_i^w(\mathbf{q}^{(i)}, \mathbf{p}^*) \right)^T \mathbf{W}_i - \boldsymbol{\tau}^{(i)} \right\| \leq \delta_w \right), \quad (13.2)$$

где \mathbf{W}_i обозначает решение наименьших квадратов системы, состоящей из $(1..i)$ уравнений статического равновесия, которое выражается через соответствующую псевдоинверсию (10), а δ_τ и δ_w – это допуски для крутящих моментов в шарнирах и невязок методом наименьших квадратов соответственно. Следует отметить, что здесь, в соответствии с утверждением 2, расширенный якобиан $\mathbf{J}_i^w(\mathbf{q}^{(i)}, \mathbf{p}^*)$ можно вычислить для любой произвольной точки \mathbf{p}^* , но на практике удобно использовать заведомо известные координаты i -го датчика крутящего момента $\mathbf{p}^* = \mathbf{p}^i$.

Данную неопределенность невозможно уменьшить, используя только внутренние датчики робота, поэтому предлагается добавить к системе идентификации внешние сенсоры. В качестве внешних сенсоров был использован сенсор глубины, например сенсор Kinect или трехмерный лидар, позволяющий получить облако точек. Зная облако точек, принадлежащее объектам в зоне действия робота, а также конфигурацию робота и его положение относительно камеры, возможно совместить системы координат и найти расстояние между роботом и препятствием. Пример эксперимента представлен на рис. 4, а и б, где в качестве внешнего сенсора использован 3D-лидар Hokuyo YVT-35LX.

Очевидно, что пересечение модели робота и модели препятствия, построенное на основе об-



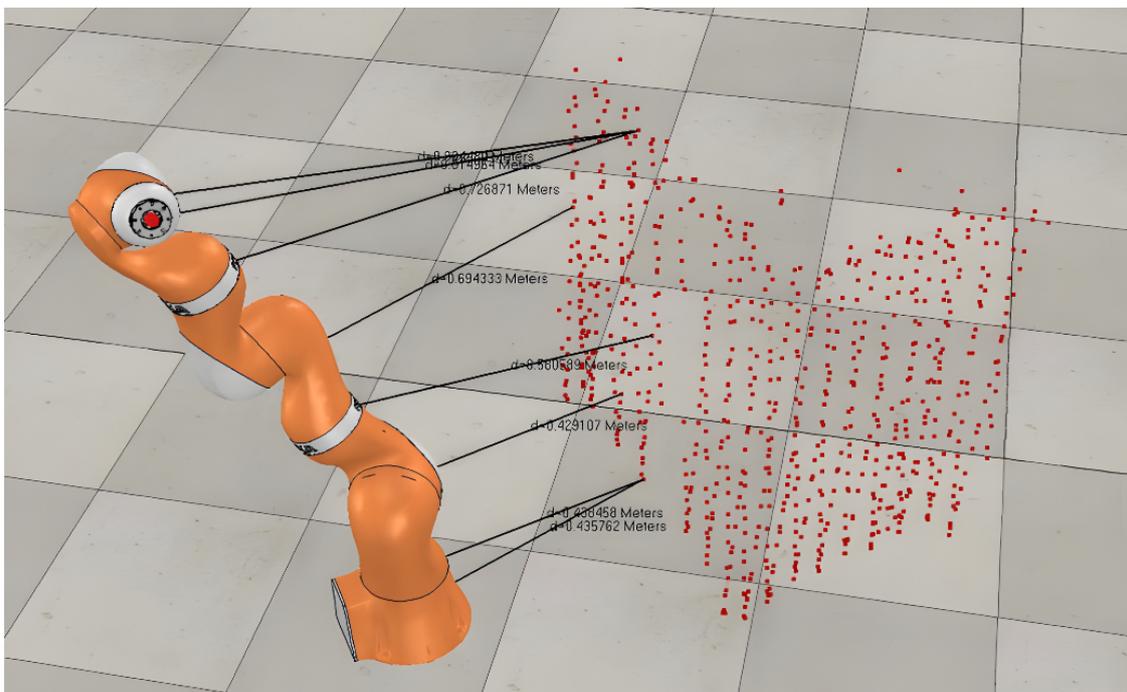
■ **Рис. 4.** Примеры эксперимента с использованием внешнего сенсора: а – изображение с камеры; б – изображение с лидара

■ **Fig. 4.** Examples of experiments using an external sensor: а – image from camera; б – image from lidar

лака точек, будет являться местом приложения внешней силы. Сам вектор силы взаимодействия можно вычислить, используя уравнения статического равновесия для точки пересечения/контакта.

Важно отметить, что эксперименты с реальным сенсором и роботом показали недостаточную плотность облака точек, получаемого с использованием трехмерного лидара. В силу разреженности точек, отвечающих за препятствие, построение его модели крайне неточно и не может быть

использовано для определения точки контакта. С одной стороны, это явно препятствует использованию внешнего сенсора для задачи определения параметров взаимодействия для приложений, где необходимо обеспечить максимальную безопасность. Но, с другой стороны, точности сенсора достаточно для определения индекса звена k^* как индекса ближайшего звена к объекту взаимодействия. Далее, используя выражения (13.1) и (13.2), получаем интервал возможных индексов $k \in [k_{\min}, k_{\max}]$ и выбираем ближайший



■ **Рис. 5.** Виртуальный двойник робота в симуляторе VREP и облако точек, полученное с использованием лидара

■ **Fig. 5.** Virtual twin of the robot in the VREP simulator and a point cloud obtained using lidar

индекс k^* , тем самым разрешая неопределенность в результатах алгоритма на основе изменений только с внутренних сенсоров. Еще одним недостатком является ограниченность поля зрения сенсора, при этом, даже используя большое количество сенсоров, нельзя гарантировать, что точка контакта будет в поле зрения.

Другое возможное применение внешнего сенсора заключается в его использовании для фазы преконтакта, т. е. еще до того, как произошло столкновение. Для этого необходимо определить расстояния между звеньями робота и препятствием (рис. 5). Далее можно воспользоваться алгоритмом обхода препятствия, например основанного на алгоритмах машинного обучения [25]. Применение внешнего сенсора для различных реакций будет рассмотрено в следующих работах.

Заключение

В статье рассмотрен новый алгоритм оценки силы взаимодействия и точки ее приложения для взаимодействия человека и робота с использованием данных измерений, полученных от внутренних датчиков крутящего момента в шарнирах и внешнего датчика глубины. Ключевой особенностью алгоритма является его аналитический характер, что позволяет существенно сократить время вычислений по сравнению с традиционными подходами, основанными на методах прямой оптимизации. Таким образом,

разработанный алгоритм хорошо подходит для реальных промышленных приложений, где время отклика имеет решающее значение из соображений безопасности. Кроме того, алгоритм способен оценить искомые параметры даже в некоторых сложных случаях, когда линия действия силы взаимодействия пересекает одну или несколько осей шарниров, что приводит к нулевым измерениям крутящего момента от соответствующих датчиков. Существующие методы обычно игнорируют такие случаи. Полученные результаты показали, что идентификации параметров взаимодействия робота и человека крайне затруднительны с использованием только внешних сенсоров, однако данные сенсоры могут значительно снизить неопределенность результатов, полученных с помощью только внутренних сенсоров робота в сингулярных случаях.

Слабым местом предложенного метода является его достаточно низкая устойчивость к шуму измерений, что наблюдалось при моделировании. Хотя точность алгоритма приемлема для практически наблюдаемого уровня шума, при очень высоком уровне шума вполне возможно, что разработанная аналитическая методика не даст никакого решения. В последнем случае возможно получить только примерное решение, комбинируя информацию с внутренних и внешних сенсоров. По этой причине вопросы устойчивости, а также оценка параметров в некоторых особых случаях будут в центре внимания будущих работ.

Литература

1. Falco J., Marvel J., Norcross R. Collaborative robotics: Measuring blunt force impacts on humans. *Chest*, 2012, vol. 140, no. 210, p. 45.
2. Zanchettin A., Ceriani N., Rocco P., Ding H., Matthias B. Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: Metrics and control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, vol. 13, no. 2, pp. 882–893. doi:10.1109/TASE.2015.2412256
3. Haddadin S., De Luca A., Albu-Schaffer A. Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, vol. 33, no. 6, pp. 1292–1312. doi:10.1109/TRO.2017.2723903
4. Popov D., Mikhel S., Yagfarov R., Klimchik A., Pashkevich A. Multi-scenario contacts handling for collaborative robots applications. *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2021, pp. 2985–2992. doi:10.1109/IROS51168.2021.9636113
5. Argall B., Billard A. A survey of tactile human-robot interactions. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, vol. 58, no. 10, pp. 1159–1176. doi:10.1016/j.robot.2010.07.002
6. Ogenyi U., Liu J., Yang C., Ju Z., Liu H. Physical human-robot collaboration: Robotic systems, learning methods, collaborative strategies, sensors, and actuators. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, vol. 51, no. 4, pp. 1888–1901. doi:10.1109/TCYB.2019.2947532
7. 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*, 2015, vol. 1, pp. 41–48. doi:10.1109/LRA.2015.2505061
8. Jain A., Killpack M. D., Edsinger A., Kemp C. C. Reaching in clutter with whole-arm tactile sensing. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, vol. 32, pp. 458–482. doi:10.1177/0278364912471865
9. Chavez F. J. A., Kangro J., Traversaro S., Nori F., Pucci D. Contact force and joint torque estimation using skin. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, vol. 3, pp. 3900–3907. doi:10.1109/LRA.2018.2856914
10. Dahiya R. S., Mittendorfer P., Valle M., Cheng G., Lumelsky V. J. Directions toward effective utilization

- of tactile skin: A review. *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, pp. 4121–4138. doi:10.1109/JSEN.2013.2279056
11. Magrini E., Ferraguti F., Ronga A. J., Pini F., De Luca A., Leali F. Human-robot coexistence and interaction in open industrial cells. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 61, pp. 101846. doi:10.1016/j.rcim.2019.101846
 12. De Luca A., Flacco F. Integrated control for phri: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration. *IEEE RAS Intern. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2012, pp. 288–295. doi:10.1109/BioRob.2012.6290917
 13. Cherubini A., Passama R., Lasnier A., Fraise P. Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, vol. 40, pp. 1–13. doi:10.1016/j.rcim.2015.12.007
 14. Halme R.-J., Lanz M., Kämäräinen J., Pieters R., Latokartano J., Hietanen A. Review of vision-based safety systems for human-robot collaboration. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 72, pp. 111–116. doi:10.1016/j.procir.2018.03.043
 15. García J. G., Robertsson A., Ortega J. G., Johansson R. Sensor fusion for compliant robot motion control. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, vol. 24, pp. 430–441. doi:10.1109/TRO.2008.918057
 16. McMahan W., Romano J. M., Kuchenbecker K. J. Using accelerometers to localize tactile contact events on a robot arm. *Proc. of Workshop on Advances in Tactile Sensing and Touch-Based Human-Robot Interaction, ACM/IEEE Intern. Conf. on Human-Robot Interaction*, 2012, pp. 1–6.
 17. Iakubchik I., Iakubchik A., Nakamura Y. Acoustic determination of contact on the exterior surface of the robot. *IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 2021, pp. 387–389. doi:10.1109/ElConRus51938.2021.9396486
 18. Likar N., Zlajpah L. External joint torque-based estimation of contact in formation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, vol. 11, no. 7, p. 107. doi:10.5772/58834
 19. Popov D., Klimchik A. Real-time external contact force estimation and localization for collaborative robot. *IEEE Intern. Conf. on Mechatronics (ICM)*, 2019, vol. 1, pp. 646–651. doi:10.1109/ICMECH.2019.8722893
 20. Manuelli L., Tedrake R. Localizing external contact using proprioceptive sensors: The contact particle filter. *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems 28 (IROS)*, 2016, pp. 5062–5069. doi:10.1109/IROS.2016.7759743
 21. Zwiener A., Hantén R., Schulz C., Zell A. Armcl: Arm contact point localization via monte carlo localization. *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019, pp. 7105–7111. doi: 10.1109/IROS40897.2019.8967907
 22. Pang T., Umenberger J., Tedrake R. Identifying external contacts from joint torque measurements on serial robotic arms and its limitations. *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2021, pp. 6476–6482. doi:10.1109/ICRA48506.2021.9561761
 23. Popov D., Klimchik A., Pashkevich A. Real-time estimation of multiple potential contact locations and forces. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, vol. 6, no. 4, pp. 7025–7032. doi:10.1109/LRA.2021.3095902
 24. Flacco F., Paolillo A., Kheddar A. Residual-based contacts estimation for humanoid robots. *IEEE-RAS 16th Intern. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2016, pp. 409–415. doi:10.1109/HUMANOIDS.2016.7803308
 25. Solovyeva E. B., Abdullah A. Controlling system based on neural networks with reinforcement learning for robotic manipulator. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 5, с. 24–32. doi:10.31799/1684-8853-2020-5-24-32

UDC 004.896

doi:10.31799/1684-8853-2023-5-2-11

EDN: ISTWOV

Parameter identification for physical robot-environment interaction using internal and external sensorsD. I. Popov^a, PhD, Research Fellow, orcid.org/0000-0001-9341-8083, d.popov@innopolis.ru^aInnopolis University, 1, Universitetskaya St., 420500, Innopolis, Russian Federation

Introduction: The development of a robotic system in which a robot and a human jointly solve a given task in a safe and efficient way is one of the key challenges in the field of industrial robotics. In a collaborative robotic workcell direct physical interactions between robots, humans and the environment are expected. **Purpose:** To develop a method for the identification of physical interaction parameters including the force and the point of its application. **Results:** We propose an analytical algorithm for the interaction parameter estimation using the measurement data obtained from the internal torque sensors in robot joints and the external depth sensor. The algorithm is based on the extension of the static equilibrium equations, which makes it possible to find the desired interaction force and the line of its action. This general solution is then combined with geometric constraints describing the manipulator surfaces and the corresponding friction cones. Particular attention is paid to singular cases that arise when the interaction force action line intersects one or several sensor axes, which causes multiple solutions. **Practical relevance:** The key feature of the proposed algorithm is its analytical nature, which makes it possible to significantly reduce the computation time as compared to conventional approaches based on direct optimization methods. Thus, the proposed algorithm is well suited for real industrial applications where response time is critical for safety reasons. In addition, the algorithm is able to estimate the required parameters even in some complex cases with many possible solutions while the existing methods usually ignore such cases. The results obtained show that it is extremely difficult to identify the parameters of robot-

environment interaction using external sensors only, but their use can significantly reduce the uncertainty of the results obtained using the internal sensors of the robot in singular cases.

Keywords — industrial robots, human-robot interaction, robot-environment interaction, identification of physical interaction parameters, force-moment sensing.

For citation: Popov D. I. Parameter identification for physical robot-environment interaction using internal and external sensors. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 5, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-5-2-11, EDN: ISTWOW

References

- Falco J., Marvel J., Norcross R. Collaborative robotics: Measuring blunt force impacts on humans. *Chest*, 2012, vol. 140, no. 210, p. 45.
- Zanchettin A., Ceriani N., Rocco P., Ding H., Matthias B. Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: Metrics and control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, vol. 13, no. 2, pp. 882–893. doi:10.1109/TASE.2015.2412256
- Haddadin S., De Luca A., Albu-Schaffer A. Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, vol. 33, no. 6, pp. 1292–1312. doi:10.1109/TRO.2017.2723903
- Popov D., Mikhel S., Yagfarov R., Klimchik A., Pashkevich A. Multi-scenario contacts handling for collaborative robots applications. *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2021, pp. 2985–2992. doi:10.1109/IROS51168.2021.9636113
- Argall B., Billard A. A survey of tactile human-robot interactions. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, vol. 58, no. 10, pp. 1159–1176. doi:10.1016/j.robot.2010.07.002
- Ogenyi U., Liu J., Yang C., Ju Z., Liu H. Physical human-robot collaboration: Robotic systems, learning methods, collaborative strategies, sensors, and actuators. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, vol. 51, no. 4, pp. 1888–1901. doi:10.1109/TCYB.2019.2947532
- 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*, 2015, vol. 1, pp. 41–48. doi:10.1109/LRA.2015.2505061
- Jain A., Killpack M. D., Edsinger A., Kemp C. C. Reaching in clutter with whole-arm tactile sensing. *The International Journal of Robotics Research*, 2013, vol. 32, pp. 458–482. doi:10.1177/0278364912471865
- Chavez F. J. A., Kangro J., Traversaro S., Nori F., Pucci D. Contact force and joint torque estimation using skin. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, vol. 3, pp. 3900–3907. doi:10.1109/LRA.2018.2856914
- Dahiya R. S., Mittendorf P., Valle M., Cheng G., Lumelsky V. J. Directions toward effective utilization of tactile skin: A review. *IEEE Sensors Journal*, 2013, vol. 13, pp. 4121–4138. doi:10.1109/JSEN.2013.2279056
- Magrini E., Ferraguti F., Ronga A. J., Pini F., De Luca A., Leali F. Human-robot coexistence and interaction in open industrial cells. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 61, pp. 101846. doi:10.1016/j.rcim.2019.101846
- De Luca A., Flacco F. Integrated control for phri: Collision avoidance, detection, reaction and collaboration. *IEEE RAS Intern. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2012, pp. 288–295. doi:10.1109/BioRob.2012.6290917
- Cherubini A., Passama R., Crosnier A., Lasnier A., Fraisse P. Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, vol. 40, pp. 1–13. doi:10.1016/j.rcim.2015.12.007
- Halme R.-J., Lanz M., Kämäräinen J., Pieters R., Latokartano J., Hietanen A. Review of vision-based safety systems for human-robot collaboration. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 72, pp. 111–116. doi:10.1016/j.procir.2018.03.043
- García J. G., Robertsson A., Ortega J. G., Johansson R. Sensor fusion for compliant robot motion control. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, vol. 24, pp. 430–441. doi:10.1109/TRO.2008.918057
- McMahan W., Romano J. M., Kuchenbecker K. J. Using accelerometers to localize tactile contact events on a robot arm. *Proc. of Workshop on Advances in Tactile Sensing and Touch-Based Human-Robot Interaction, ACM/IEEE Intern. Conf. on Human-Robot Interaction*, 2012, pp. 1–6.
- Iakubchik I., Iakubchik A., Nakamura Y. Acoustic determination of contact on the exterior surface of the robot. *IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 2021, pp. 387–389. doi:10.1109/ElCon-Rus51938.2021.9396486
- Likar N., Zlajpah L. External joint torque-based estimation of contact in formation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, vol. 11, no. 7, p. 107. doi:10.5772/58834
- Popov D., Klimchik A. Real-time external contact force estimation and localization for collaborative robot. *IEEE Intern. Conf. on Mechatronics (ICM)*, 2019, vol. 1, pp. 646–651. doi:10.1109/ICMECH.2019.8722893
- Manuelli L., Tedrake R. Localizing external contact using proprioceptive sensors: The contact particle filter. *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems 28 (IROS)*, 2016, pp. 5062–5069. doi:10.1109/IROS.2016.7759743
- Zwiener A., Hanten R., Schulz C., Zell A. Armcl: Arm contact point localization via monte carlo localization. *IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019, pp. 7105–7111. doi:10.1109/IROS40897.2019.8967907
- Pang T., Umenberger J., Tedrake R. Identifying external contacts from joint torque measurements on serial robotic arms and its limitations. *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2021, pp. 6476–6482. doi:10.1109/ICRA48506.2021.9561761
- Popov D., Klimchik A., Pashkevich A. Real-time estimation of multiple potential contact locations and forces. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, vol. 6, no. 4, pp. 7025–7032. doi:10.1109/LRA.2021.3095902
- Flacco F., Paolillo A., Kheddar A. Residual-based contacts estimation for humanoid robots. *IEEE-RAS 16th Intern. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2016, pp. 409–415. doi:10.1109/HUMANOIDS.2016.7803308
- Solovyeva E. B., Abdullah A. Controlling system based on neural networks with reinforcement learning for robotic manipulator. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 5, pp. 24–32. doi:10.31799/1684-8853-2020-5-24-32