

Д. И. Попов, мл. науч. сотр., d.popov@innopolis.ru,
 А. С. Климчик, Ph.D, руководитель Центра развития робототехники, a.klimchik@innopolis.ru,
 АНО ВО "Университет Иннополис", г. Иннополис, Россия

Использование датчиков усилия в суставах для определения точки и типа коллизии в промышленном роботе¹

Недавние достижения в области создания сенсоров позволили получить робототехнические комплексы с силовыми датчиками в каждом суставе. На данный момент эти датчики используются только для определения наличия коллизии. Данная работа показывает возможность получения также информации о точке и типе контакта. Эта информация впоследствии может быть использована для выбора стратегии поведения робота. Определение точки контакта выполнено с помощью двух подходов: аналитического и с использованием методов машинного обучения. Описанные алгоритмы были опробованы на промышленном манипуляторе Kuka iiwa LBR 14 R820, контрольная информация о экспериментах была получена с использованием 3D-лидара.

Ключевые слова: взаимодействие человека и робота, детектирование коллизий, локализация коллизий, классификация коллизий, промышленные роботы, нейронные сети

Введение

Могут ли роботы находиться в одной среде с человеком? Классические промышленные роботы привычно считаются быстрыми, тяжелыми и объемными. Высокие динамические характеристики промышленных роботов сделали их опасными для человека и окружения. Их ситуационная осведомленность весьма ограничена используемыми сенсорами, что делает их крайне опасными для человека. Один из наиболее популярных методов обеспечения безопасности человека вблизи робота предусматривает помещение робота в защитную клетку. Но в последнее время популярность набирает новый тренд, называемый человеко-машинным взаимодействием, или сотрудничеством.

Сотрудничество человека и робота — одна из современных тенденций в промышленной робототехнике. Это сотрудничество позволяет сочетать в себе силу и точность роботизированного манипулятора с интеллектом и ситуационной осведомленностью человека для повышения эффективности выполняемой задачи. В этом случае безопасность человека и окружающей среды важны из-за непосредственной близости и взаимодействия человека и окружающей среды с роботом. Современные промышленные роботы, даже те, которые были специально разработаны для взаимодействия робота и человека, могут достигать вы-

сокой скорости и развивать значительные усилия, которые могут нанести серьезный урон человеку или повредить объекты в рабочем пространстве робота. Наиболее опасными сценариями являются столкновения между роботизированной рукой и внешним объектом [1].

Чтобы уменьшить этот риск и улучшить взаимодействие между человеком и манипулятором, требуется быстрый и надежный алгоритм обработки коллизий. В настоящее время безопасность человека в присутствии промышленного манипулятора может быть обеспечена двумя способами: полное избегание контактов с помощью наблюдения с внешнего устройства, такого как Kinect, с датчиком глубины [2] или высокоскоростной камерой [3] и / или с помощью совместимых движений с известной и контролируемой силой взаимодействия. Контроль импеданса [4] является одним из наиболее эффективных способов реализации совместимого движения. В этой работе мы сосредоточимся на втором подходе, используя только внутреннюю информацию о роботах.

Обнаружение и локализацию событий столкновения можно разделить на несколько подзадач:

- обнаружение столкновения;
- нахождение точки контакта и значения приложенной силы;
- классификация типа столкновения;
- формирование реакции на столкновение на основе распознанного типа, местоположения и значения приложенной силы.

Первая и вторая подзадачи обычно решаются вместе. Эти две подзадачи могут быть реше-

¹Исследование выполнено при поддержке Гранта Российского научного фонда № 17-19-01740.

ны с помощью системы внешнего зрения [5, 6] или другой бесконтактной системы. Но главная проблема этих систем состоит в том, что невозможно полностью охватить рабочее пространство робота. Другой способ — использовать внешние устройства, установленные на роботе. Примером этой системы могут быть тактильные датчики, которые охватывают суставы робота [7–9]. Авторы в работе [10] предлагают использовать акселерометры, прикрепленные к поверхности руки робота, для обнаружения и локализации контакта. В статье [11] данные от 6D-силомоментного датчика объединены с информацией о движении робота, и для локализации контакта используется вероятностный подход.

Оценка и локализация внешней силы также могут быть реализованы с использованием только внутренних датчиков. В этом случае обнаружение столкновения становится более сложным, но разрешимым, если датчики крутящего момента установлены в каждом суставе. Авторы в работе [12] находят внешнюю силу из измерений датчиков внутреннего крутящего момента. В статье [13] для локализации контакта использовалось моделирование временных рядов и нечеткая идентификация. Сравнение заданного и измеренного крутящего момента в модели управления моментом также может использоваться для оценки силы [14, 15]. В работе [16] авторы наблюдали фрикционную модель и ток двигателя в каждом суставе для оценки наличия коллизии. Онлайн-фильтрация тока двигателя позволяет различать нужные контакты и столкновения в промышленном роботе [17]. Метод, основанный на физических величинах, таких как полная энергия и обобщенный импульс манипулятора робота, для обнаружения препятствия на пути робота был предложен в работах [18, 19].

Третья подзадача заключается в анализе данных о событии столкновения, полученных на предыдущем шаге. Основная цель этого шага — найти соответствующий класс из списка предопределенных классов. Следует подчеркнуть, что эта проблема не была решена ранее для случая различных типов столкновений, обсуждаемых в этой работе. Основные усилия в этом направлении были сделаны для столкновений с человеком [1, 20] и сотрудничества человек — робот [17].

Решая последнюю, четвертую подзадачу, мы выбираем подходящую реакцию робота на ос-

нове ранее классифицированного типа контакта, местоположения точки контакта и значение внешней силы. Доступны различные стратегии: от простой аварийной остановки до комплексного поведения для избегания столкновений [20].

В нашей работе мы рассматриваем первые три подзадачи. Мы будем использовать совместные датчики крутящего момента и значения датчика для обнаружения и локализации внешней силы. Мы также предоставляем топологию классификации столкновений и алгоритм их классификации на основе нейронных сетей. Для достижения этого было получено быстрое и стабильное соединение между Robot Operating System (ROS) и роботом. Существующее решение для ROS было дополнено с топиками, необходимыми для этих исследовательских данных. После этого данные были записаны с использованием различных внешних сил, действующих на робота в разных точках. Наборы данных были аннотированы для дальнейшего применения в качестве контрольных данных. Измерения внутреннего крутящего момента и энкодеров двигателей были использованы для определения потенциальных столкновений. В этой работе предлагаются два пути решения этой проблемы: использование классического аналитического подхода и подхода с использованием машинного обучения, реализованного с помощью нейронной сети. Предложенные алгоритмы были рассмотрены на промышленном роботе Kuka iiwa LBR 14 R820, контрольная информация о характере контакта и его местоположении была получена с помощью 3D-лидара и камеры.

Используемые средства

В качестве исследуемого был выбран промышленный манипулятор Kuka iiwa LBR 14. Управление роботом осуществлялось с использованием расширенного пакета ROS (данный пакет впервые был представлен в работе [21]), позволяющего считывать крутящий момент сустава, внешний крутящий момент, текущее положение, желаемое положение и т. д. Используемые средства изображены на рис. 1.

Для создания набора данных, состоящего из различных событий столкновения, были проведены эксперименты с роботом Kuka iiwa. Каждый набор данных состоит из 10...50 случайных траекторий с жесткостью соединения, равной 200 Н·м/рад, чтобы не нанести вред

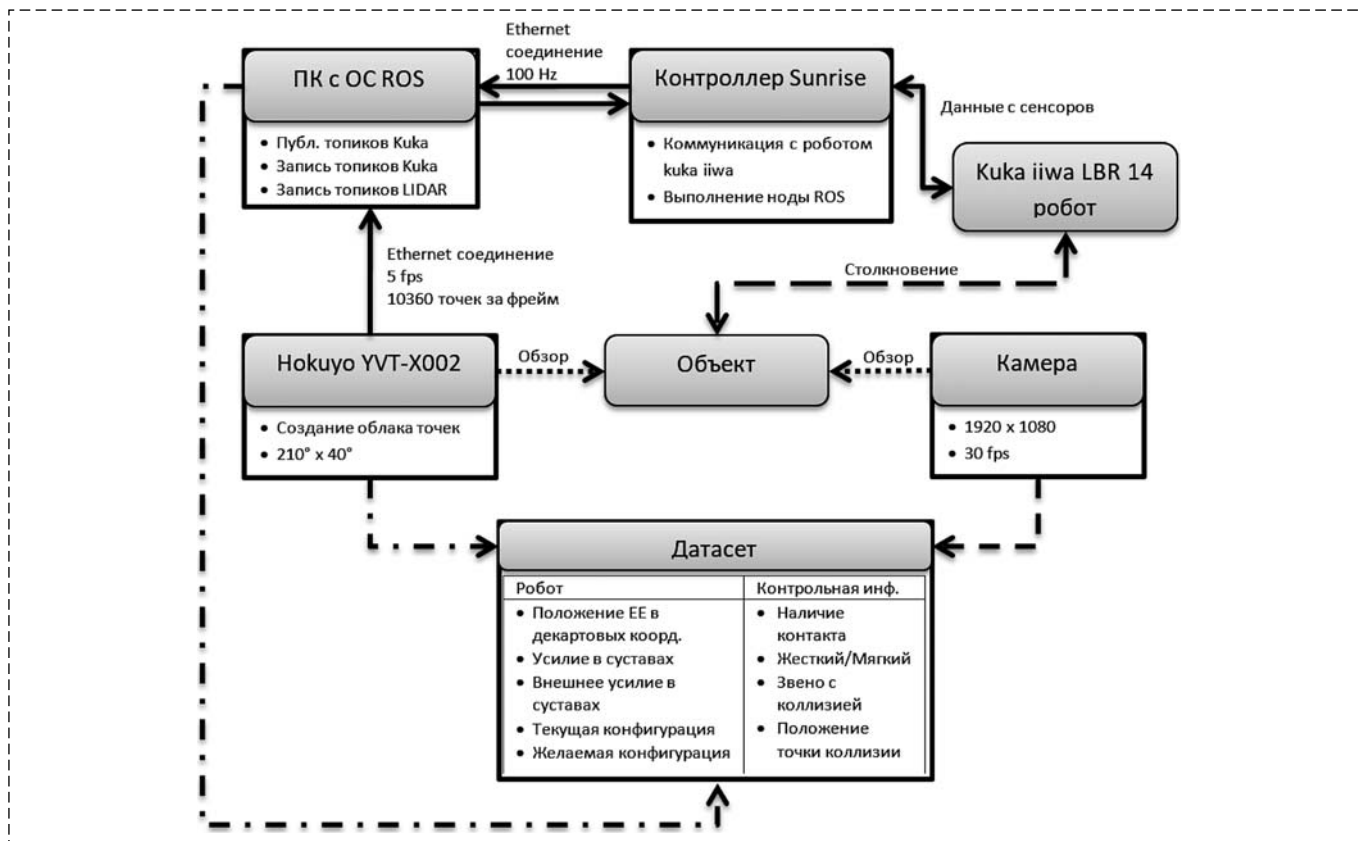


Рис. 1. Используемые средства
Fig. 1. System Setup

человеку или активировать внутренние механизмы безопасности робота. Для наборов данных все топики ROS-iiwa были записаны со средней частотой 100 Гц. Общее число записанных кадров более 430 000. Эксперименты были записаны на видеочере и 3D LIDAR Nokeyo YVT-X002. Лидар использовался с частотой 5 кадров в секунду, 10 360 точек на кадр (поле зрения $210^\circ \times 40^\circ$) с точностью ± 50 мм. Длительность наборов данных варьируется от 3 до 15 мин. Полная длительность датасета составляет 103 мин, было собрано и аннотировано 300 случайных траекторий и более 500 полных событий столкновения. Контрольная информация о столкновении была получена из облака точек и изображения с камеры. Пример столкновений из датасета представлен на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

Типы датасетов и длительность каждого:

- 1) смешанный мягкий и твердый динамический контакт 15 мин;
- 2) без столкновений 3 мин;
- 3) мягкий динамический контакт 16 мин;
- 4) твердый динамический объект 13 мин;
- 5) твердый статический контакт 26 мин;
- 6) статическая нагрузка 30 мин.

Детектирование коллизий

Детектирование коллизий может быть выполнено с помощью оценки моментов, вызванных внешней силой в каждом суставе, и сравнения их с минимальными пороговыми значениями. Если значение внешней силы $|\tau_{ext}|$ больше порогового значения хотя бы в одном из суставов, тогда присутствует коллизия. Значение момента, вызванного внешней силой, τ_{ext} может быть найдено с использованием динамической модели робота и крутящих моментов в суставах:

$$\tau = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_{ext}; \quad (1)$$

$$\tau = \tau_{dyn} + \tau_{ext}; \quad (2)$$

$$\tau_{ext} = \tau - \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}), \quad (3)$$

где \mathbf{q} — вектор размерности 7×1 текущей конфигурации робота, задающий значение поворота каждого сустава в данный момент времени; τ — вектор крутящего момента в суставах; \mathbf{F}_{ext} — внешняя сила, действующая на робота; \mathbf{J} — якобиан в точке приложения внешней силы; τ_{dyn} — вектор момента в суставах, вы-

званного динамическими силами; τ_{ext} — вектор момента в суставах, вызванного внешней силой; \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{G} — инерциальная, центробежная (Кориолисова) и гравитационная матрицы манипулятора в заданной конфигурации соответственно.

Также могут быть применены методы машинного обучения, входными данными для которого являются информация с датчиков силы робота, а выходом — класс (столкновение/нет столкновения). Результаты применения различных методов показаны в табл. 1. Пороговые значения, используемые в данной работе: сустав № 1 — 2,5 Н·м; сустав № 2 — 2,5 Н·м; сустав № 3 — 2 Н·м; сустав № 4 — 2 Н·м; сустав № 5 — 1 Н·м; сустав № 6 — 1 Н·м; сустав № 7 — 1 Н·м. Пороговые значения были получены исходя из максимальной наблюдаемой амплитуды внешнего усилия при отсутствии внешнего воздействия.

Локализация коллизии

Локализация коллизии может быть выполнена до уровня звеньев или уровня конкретной точки на поверхности робота. Алгоритмы машинного обучения могут быть использованы для решения задачи классификации. В данном случае входом являются показания с датчиков силы, а выходом — класс, указывающий на звено робота с коллизией. Точность использованных методов показана в табл. 2.

Для определения точки коллизии были использованы две нейронные сети (НС). Данные НС решают задачу регрессии, выходом которой является нормированное расстояние от базы робота до точки контакта. Первая НС состоит из двух слоев (28 и 14 нейронов), вторая сеть состоит из трех слоев (56, 28 и 14 нейронов). Пример работы показан на рис. 3 (см. третью сторону обложки), где в дополнении к показаниям с выхода нейронных сетей добавлена контрольная информация.

Аналитический метод определения точки коллизии основан на методе глобальной оптимизации, использованный в работе [22].

Общая сложность аналитического решения очень высока из-за необходимости вычисления точки контакта (три параметра x , y , z), внешней силы (F_x , F_y , F_z), внешних моментов (M_x , M_y , M_z). Невозможно найти решение в режиме реального времени даже с очень мощным

Таблица 1
Table 1

Методы детектирования коллизии
Methods of collision detection

Метод	Точность, %
Логистическая регрессия	82,5
Дерево принятия решений	98,1
к-ближайших соседей	98,7
Метод опорных векторов	99,0
Нейронная сеть	99,2
Метод порогового значения	97,8

Таблица 2
Table 2

Точность методов для определения звена с коллизией
Accuracy of collision link estimation methods

Метод	Точность, %
Метод порогового значения	16,5
Дерево принятия решений	70,0
к-ближайших соседей	92,1
Нейронная сеть	94,3

компьютером, поэтому необходимо уменьшить размерность проблемы.

Чтобы уменьшить сложность проблемы, нам необходимо включить дополнительные ограничения и допущения в систему. К исходному предположению, что в один момент может произойти только одно столкновение, необходимо добавить следующие:

- рассматриваются только те внешние силы, моменты которых равны нулю;
- робот представлен в виде линий (звеньев), соединенных суставами, без учета реальной геометрии робота (рис. 4);
- внешняя сила может применяться только по нормали к линии. Тангенциальная сила мо-

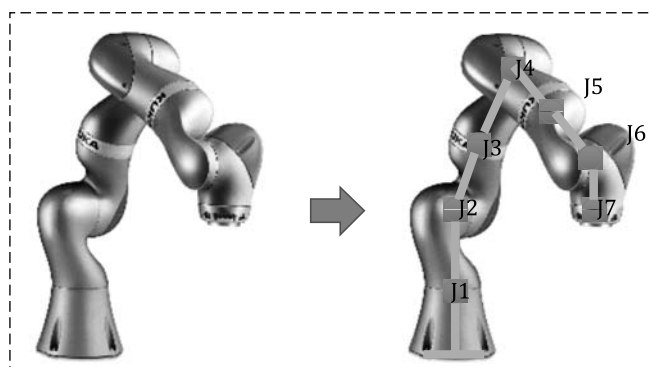


Рис. 4. Суставы и звенья робота
Fig. 4. Robot links and joints

жет влиять только на робота, когда учитывается трение контакта. При использовании тангенциальной составляющей без трения контактная модель может быть игнорирована.

Однако на практике значение τ_{dyn} в соотношении (1) не всегда корректно из-за неправильной оценки параметров динамической модели, шума датчиков и т. д. В данной работе мы предполагаем, что внешние моменты, полученные с использованием динамической модели и внешних усилий от датчиков робота, пригодны для использования для процесса оценки точки контакта.

Внешняя сила, действующая на робота, может быть получена с использованием якобиана:

$$\tau_{ext} = \mathbf{J}(\mathbf{q})^T \mathbf{F}_{ext} \quad (4)$$

где \mathbf{q} — вектор текущей конфигурации робота; $\mathbf{F}_{ext} = [F_x F_y F_z \tau_x \tau_y \tau_z]^T$ — внешняя сила; τ_{ext} — внешний момент; \mathbf{J} — якобиан робота. Используя допущение о том, что внешний момент равен нулю, можно записать: $\mathbf{F}_{ext} = [F_x F_y F_z 000]^T$. Внешняя сила также может быть представлена как

$$\mathbf{F}_{ext} = \|\mathbf{F}_{ext}\| \overline{\mathbf{F}_{ext}}, \quad (5)$$

где $\overline{\mathbf{F}_{ext}}$ является нормированным вектором, представляющим направление приложенной силы. С предположением о геометрии робота и силах, имеющих только нормальную составляющую (как на рис. 5):

$$\mathbf{F}_{ext} = \|\mathbf{F}_{ext}\| \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где φ — угол приложенной силы в цилиндрической системе координат.

Предполагая, что столкновение может происходить не только в конечном, но и в любом другом звене робота, получаем:

$$\tau_{ext} = \mathbf{J}(s, \mathbf{q})^T \mathbf{F}_{ext}, \quad (7)$$

$$s = l/L, \quad (8)$$

где s — точка в нормированном S -пространстве робота (0 — основание робота, 1 — его послед-

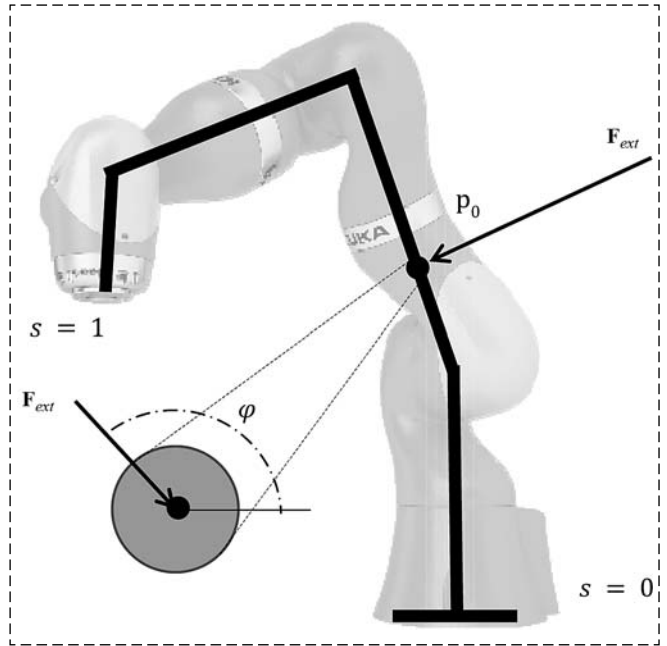


Рис. 5. Внешняя сила и ее упрощенная модель
Fig. 5. External force and its simplified model

нее звено); l — расстояние от основания робота до точки контакта, L — общая длина робота; $\mathbf{J}(s, \mathbf{q})$ — якобиан от базы робота до точки s . Тогда для потенциальной точки контакта p_s эквивалентное усилие в суставах может быть найдено как

$$\tau_s = \mathbf{J}(p_s, \mathbf{q})^T \mathbf{F}_s(\varphi). \quad (9)$$

Оценочная сила может быть представлена амплитудой и направлением:

$$\mathbf{F}_s = \|\mathbf{F}_s\| \overline{\mathbf{F}_s}, \quad (10)$$

где $\overline{\mathbf{F}_s}$ является нормированным вектором, представляющим направление приложенной силы. Нет необходимости включать вычисление амплитуды силы; его можно упростить, обеспечив нормализацию между оценочной внешней силой и моментами:

$$\mathbf{F}_s = \frac{\|\tau_s\|}{\|\overline{\tau_s}\|}. \quad (11)$$

Теперь для оценки положения контакта, амплитуды и направления внешней силы требуются только два параметра. Эти параметры являются потенциальной точкой контакта s и углом приложенной силы в цилиндрической системе координат φ . Поиск значений для s и φ

может быть выполнен глобальным алгоритмом оптимизации. Целевая функция здесь может быть сформулирована как

$$f_{objective} = \left\| \frac{\tau_m}{\tau_m} - \frac{\tau_s}{\tau_s} \right\|, \quad (12)$$

где τ_m представляет собой измеренное внешнее усилие от датчиков усилия в реальном роботе работа. Проблема оптимизации ограничена:

$$0 \leq s \leq 1; \quad (13)$$

$$0 \leq p \leq 1, \quad p = \frac{\varphi}{2\pi}. \quad (14)$$

Согласно работе [22], оптимизация выполняется в два этапа:

1. Глобальная оптимизация. Для глобальной оптимизации использовался метод DIRECT [23]. Метод DIRECT делит пространство задач на прямоугольники и оценивает целевую функцию в центрах этих прямоугольников, выражая прямоугольники с наименьшими значениями.

2. Локальная оптимизация. Метод DIRECT требует большого числа итераций для оценки точной позиции минимума. Для уменьшения итераций метода DIRECT используется локальная оптимизация. Локальный оптимизатор использует результат с выхода метода DIRECT с небольшим интервалом в качестве входного сигнала.

При совпадении эквивалентных значений с реальными можно говорить о нахождении

Сравнение алгоритмов локализации
Comparison of localization methods

Метод	СКО, см
Аналитический	5,37
Нейронная сеть 1	8,43
Нейронная сеть 2	9,17

эквивалентной точке коллизии. В отличие от методов, связанных с машинным обучением, данный алгоритм позволяет найти модуль внешней силы, а также ее направление. Пример работы алгоритма представлен на рис. 6. Сравнение значений среднеквадратической ошибки (СКО) для методов с использованием НС, а также для аналитического алгоритма, представлены в табл. 3).

Классификация коллизий

Классификация коллизий начинается с детектирования присутствия коллизии. По длительности коллизии можно разделить на единичные и продолжительные. Например, все контакты длительностью больше 1 с могут считаться продолжительными.

Согласно задаче робота коллизии могут быть нежелательными и целенаправленными. Нежелательными могут быть, например, контакты робот — человек для задачи, в которых

предполагается только контакты робот — задача (контакты между роботом и деталью как, например, при задачах механообработки).

Наблюдая за характеристикой контакта во времени, можно определить тип объекта столкновения. На первом этапе деление идет на типы объекта — твердый и мягкий. Твердый объект должен иметь более резкое изменение характеристики контакта, чем мягкий. На втором этапе оценивается положение объекта относительно робота. Статические объекты остаются на одном месте до и после коллизии, тогда как динамические могут его менять. Примером твердого статического объекта могут служить стены, твердым ди-

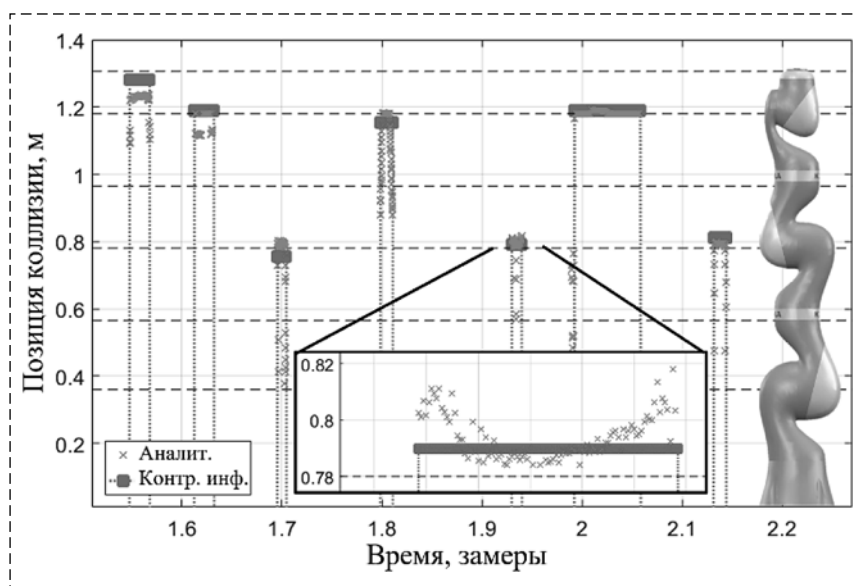


Рис. 6. Определение точки коллизии с использованием аналитического алгоритма
Fig. 6. Position of collision obtained with analytical approach

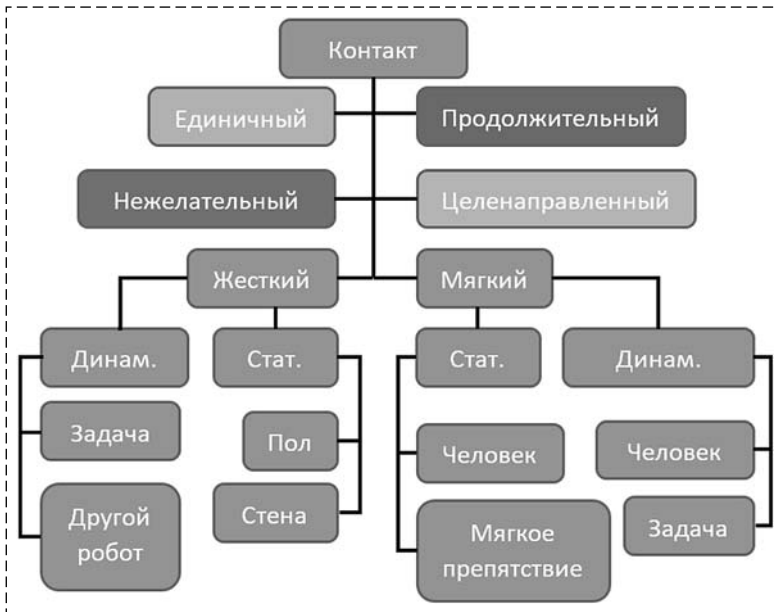


Рис. 7. Классы столкновений
Fig. 7. Classes of collision

намическим объектом может быть другой робот. Полная топология классификации представлена на рис. 7.

Алгоритм классификации для твердого/мягкого столкновения работает следующим образом:

1. Получение значения внешнего момента от всех суставов для интервала в 1 с.
2. Применение быстрого преобразования Фурье (БПФ) с 256 элементами в частотной области для интервала в 1 с до обнаружения коллизии.

Целевой класс	1	32833 48.9%	3733 5.6%	89.8% 10.2%
	2	3326 5.0%	27218 40.6%	89.1% 10.9%
		90.8% 9.2%	87.9% 12.1%	89.5% 10.5%
		1	2	
		Выходной класс		

Рис. 8. Матрица несоответствий для определения типа коллизии
Fig. 8. Confusion matrix for collision classification

3. Использование результата БПФ в качестве входных данных для НС.

Проблема классификации решена с помощью НС. Реализованная НС имеет один скрытый уровень (100 нейронов), 896 входов (7 суставов для 128 значений частоты) и два класса на выходе (мягкое столкновение, жесткое столкновение) и используется только в случае столкновения. НС позволяет корректно распознать почти 90 % контактов. Матрица несоответствий для полученной НС представлена на рис. 8.

Заключение

В работе описывается система распознавания столкновений. Задача была разделена на несколько модулей: обнаружение столкновений, локализация и классификация. Топология классификации столкновений была создана для обеспечения различных стратегий реакции, основанных на классе столкновения. Следует отметить, что аналогов представленной топологии не было найдено во время обзора литературы, кроме топологий, ограниченных столкновениями человека и робота.

Обнаружение столкновения было реализовано несколькими методами машинного обучения, прошедшими обучение по ранее полученным наборам данных, в дополнение к простому сравнению крутящего момента с пороговым значением. Наилучший результат с точностью 99,2 % был достигнут с помощью классификатора на базе НС.

Локализация контакта выполняется для уровней звена робота и точки отдельно. Звено с контактом может быть найдено НС с точностью 94,3 %. Точку контакта можно найти с помощью НС и аналитического решения. Аналитический подход основан на глобальной оптимизации и позволяет прогнозировать точку столкновения на основе данных внешнего крутящего момента с среднеквадратической ошибкой 5,37 см. Подход с использованием НС позволяет достичь точности 8,4 см. Хотя время вычисления этих алгоритмов в данной работе не рассматривается, НС позволяют проводить вычисления в реальном времени, тогда как аналитический подход может быть ограничен используемым оборудованием.

Столкновения могут быть классифицированы как жесткие или мягкие с использованием

НС с точностью 89,5 %. Другие типы конфликтов зависят от задач / окружения и должны обсуждаться в дополнение к заданной задаче робота.

Предложенные методы были испытаны с использованием промышленного манипулятора Kuka iiwa LBR 14 R820.

В данной работе рассматривается только случай с единственным внешним воздействием. Во многих операциях, где применяются промышленные роботы, всегда присутствует как минимум один контакт (контакт инструмента робота с обрабатываемой поверхностью). Второй контакт (например, контакт с человеком) будет неправильно определен и может привести к травме. Поэтому существующее решение необходимо расширить для работы с несколькими контактами одновременно.

Другое направление для будущей работы заключается в разработке и создании возможных реакций на различные столкновения. Реакция должна основываться на определенном типе, местоположении, силе коллизии.

Список литературы

1. **De Santis A.** et al. An atlas of physical human-robot interaction // *Mechanism and Machine Theory*. 2008. Vol. 43, N. 3. P. 253–270.
2. **Wang X.** et al. Robot manipulator self-identification for surrounding obstacle detection // *Multimedia Tools and Applications*. 2016. P. 1–26.
3. **Morikawa S.** et al. Realtime collision avoidance using a robot manipulator with light-weight small high-speed vision systems // *Robotics and Automation*. 2007. P. 794–799.
4. **Part S. I.** Impedance control: An approach to manipulation // *Journal of dynamic systems, measurement, and control*. 1985. Vol. 107. P. 17.
5. **Ebert D. M., Henrich D. D.** Safe human-robot-cooperation: Image-based collision detection for industrial robots // *Intelligent Robots and Systems*. 2002. Vol. 2. P. 1826–1831.
6. **Magrini E., Flacco F., De Luca A.** Control of generalized contact motion and force in physical human-robot interaction // *Robotics and Automation (ICRA)*. 2015. P. 2298–2304.
7. **Cannata G.** et al. An embedded artificial skin for humanoid robots // *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. 2008. P. 434–438.

8. **Fritzsche M., Elkmann N., Schulenburg E.** Tactile sensing: A key technology for safe physical human robot interaction // *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction*. ACM. 2011. P. 139–140.
9. **Fritzsche M., Saenz J., Penzlin F.** A large scale tactile sensor for safe mobile robot manipulation // *The Eleventh ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction*. IEEE Press. 2016. P. 427–428.
10. **McMahan W., Romano J. M., Kuchenbecker K. J.** Using accelerometers to localize tactile contact events on a robot arm // *Proc. Workshop on Advances in Tactile Sensing and Touch-Based Human-Robot Interaction*. 2012.
11. **Petrovskaya A., Park J., Khatib O.** Probabilistic estimation of whole body contacts for multi-contact robot control // *Robotics and Automation*. 2007. P. 568–573.
12. **Magrini E., Flacco F., De Luca A.** Estimation of contact forces using a virtual force sensor // *Intelligent Robots and Systems*. 2014. P. 2126–2133.
13. **Dimeas F., Avendano-Valencia L. D., Aspragathos N.** Human-robot collision detection and identification based on fuzzy and time series modelling // *Robotica*. 2015. Vol. 33, N. 09. P. 1886–1898.
14. **Hur S., Oh S. R., Oh Y.** Joint space torque controller based on time-delay control with collision detection // *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*. P. 4710–4715.
15. **Zelenak A., Pryor M., Schroeder K.** An Extended Kalman Filter for Collision Detection During Manipulator Contact Tasks // *ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference*. American Society of Mechanical Engineers. 2014. P. V001T11A005-V001T11A005.
16. **Lee S. D., Kim M. C., Song J. B.** Sensorless collision detection for safe human-robot collaboration // *Intelligent Robots and Systems*. 2015. P. 2392–2397.
17. **Geravand M., Flacco F., De Luca A.** Human-robot physical interaction and collaboration using an industrial robot with a closed control architecture // *Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2013. P. 4000–4007.
18. **De Luca A., Mattone R.** Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control // *Robotics and Automation*. 2005. P. 999–1004.
19. **De Luca A.** et al. Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm // *Intelligent Robots and Systems*. 2006. P. 1623–1630.
20. **Haddadin S.** et al. Collision detection and reaction: A contribution to safe physical human-robot interaction // *Intelligent Robots and Systems*. 2008. P. 3356–3363.
21. **Hennersperger C.** et al. Towards MRI-based autonomous robotic US acquisitions: a first feasibility study // *IEEE transactions on medical imaging*. 2017. Vol. 36, N. 2. P. 538–548.
22. **Likar N., Žlajpah L.** External joint torque-based estimation of contact information // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2014. Vol. 11, N. 7. P. 107.
23. **Finkel D. E.** DIRECT optimization algorithm user guide // *Center for Research in Scientific Computation, North Carolina State University*. 2003. Vol. 2.

The Use of Joints Force Sensors to Determine the Collision Location and Type for an Industrial Robot

D. I. Popov, d.popov@innopolis.ru, **A. S. Klimchik**, a.klimchik@innopolis.ru,
Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation

*Corresponding author: Popov D. I., M. Sc., Junior researcher,
Robotics Development Center of Innopolis University, Innopolis, Russian Federation,
e-mail: d.popov@innopolis.ru*

Recent advances in the development of sensors allowed to obtain robots with torque-sensitive sensors in each joint. At the moment, these sensors are used only to detect collision. This work shows the possibility of obtaining information on the collision point and its type. This information can subsequently be used to select the robot's behavior strategy. The contact point localization is realized using two approaches: the analytical approach and machine learning. Analytical approach is based on finding point on the robot length and direction of applied external force where an equivalent torques will be the same as torques in a real robot. In the machine learning approach various learning techniques were tested. For the collision type identification a classification tree was proposed that distinguishes soft and hard collision, purposeful and accidental, single and continuous. The algorithm at the first stage detects presence of a collision, and if there is a collision localizes it and identifies its type. The described algorithms were tested on an industrial manipulator Kuka iiwa LBR 14 R820, ground truth information about the experiments was obtained using a 3D lidar.

Keywords: human-robot interaction, contact detection, collision classification, collision localization, industrial robot, neural network

Acknowledgements: This research has been supported by the grant of Russian Science Foundation № 17-19-01740.

For citation:

Popov D. I., Klimchik A. S. The Use of Joints Force Sensors to Determine the Collision Location and Type for an Industrial Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 171–179.

DOI: 10.17587/mau.20.171-179

References

1. **De Santis A.** et al. An atlas of physical human–robot interaction, *Mechanism and Machine Theory*, 2008, vol. 43, no. 3, pp. 253–270.
2. **Wang X.** et al. Robot manipulator self-identification for surrounding obstacle detection, *Multimedia Tools and Applications*, 2016, pp. 1–26.
3. **Morikawa S.** et al. Realtime collision avoidance using a robot manipulator with light-weight small high-speed vision systems, *Robotics and Automation*, 2007, pp. 794–799.
4. **Part S. I.** Impedance control: An approach to manipulation, *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 1985, vol. 107, pp. 17.
5. **Ebert D. M., Henrich D. D.** Safe human-robot-cooperation: Image-based collision detection for industrial robots, *Intelligent Robots and Systems*, 2002, vol. 2, pp. 1826–1831.
6. **Magrini E., Flacco F., De Luca A.** Control of generalized contact motion and force in physical human-robot interaction, *Robotics and Automation (ICRA)*, 2015, pp. 2298–2304.
7. **Cannata G.** et al. An embedded artificial skin for humanoid robots, *Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2008, pp. 434–438.
8. **Fritzsche M., Elkmann N., Schulenburg E.** Tactile sensing: A key technology for safe physical human robot interaction, *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction*, ACM, 2011, pp. 139–140.
9. **Fritzsche M., Saenz J., Penzlin F.** A large scale tactile sensor for safe mobile robot manipulation, *The Eleventh ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction*, IEEE Press, 2016, pp. 427–428.
10. **McMahan W., Romano J. M., Kuchenbecker K. J.** Using accelerometers to localize tactile contact events on a robot arm,

Proc. Workshop on Advances in Tactile Sensing and Touch-Based Human-Robot Interaction, 2012.

11. **Petrovskaya A., Park J., Khatib O.** Probabilistic estimation of whole body contacts for multi-contact robot control, *Robotics and Automation*, 2007, pp. 568–573.
12. **Magrini E., Flacco F., De Luca A.** Estimation of contact forces using a virtual force sensor, *Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 2126–2133.
13. **Dimeas F., Avendano-Valencia L. D., Aspragathos N.** Human-robot collision detection and identification based on fuzzy and time series modelling, *Robotica*, 2015, vol. 33, no. 09, pp. 1886–1898.
14. **Hur S., Oh S. R., Oh Y.** Joint space torque controller based on time-delay control with collision detection, *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, pp. 4710–4715.
15. **Zelenak A., Pryor M., Schroeder K.** An Extended Kalman Filter for Collision Detection During Manipulator Contact Tasks, *ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 2014, pp. V001T11A005-V001T11A005.
16. **Lee S. D., Kim M. C., Song J. B.** Sensorless collision detection for safe human-robot collaboration, *Intelligent Robots and Systems*, 2015, pp. 2392–2397.
17. **Geravand M., Flacco F., De Luca A.** Human-robot physical interaction and collaboration using an industrial robot with a closed control architecture, *Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2013, pp. 4000–4007.
18. **De Luca A., Mattone R.** Sensorless robot collision detection and hybrid force/motion control, *Robotics and Automation*, 2005, pp. 999–1004.
19. **De Luca A.** et al. Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm, *Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 1623–1630.
20. **Haddadin S.** et al. Collision detection and reaction: A contribution to safe physical human-robot interaction, *Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 3356–3363.
21. **Hennersperger C.** et al. Towards MRI-based autonomous robotic US acquisitions: a first feasibility study, *IEEE transactions on medical imaging*, 2017, vol. 36, no. 2, pp. 538–548.
22. **Likar N., Zlajpah L.** External joint torque-based estimation of contact information, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, vol. 11, no. 7, pp. 107.
23. **Finkel D. E.** DIRECT optimization algorithm user guide, Center for Research in Scientific Computation, North Carolina State University, 2003, vol. 2.