

# TRANSPORT-BY-THROWING — РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРЕДМЕТОВ ПЕРЕБРОСОМ: ОБСУЖДЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

К. В. Миронов

**Аннотация.** Перемещение предметов перебросом — это перспективный способ робототехнической транспортировки деталей в гибких производственных системах. В данном обзоре рассматриваются задачи, связанные с реализацией этого подхода. В кратком введении в современные системы транспортировки обсуждаются недостатки традиционного конвейерного подхода. Дается обзор исследований по транспортировке путем броска и захвата (Transport-by-Throwing, TbT). Обсуждается важный аспект перемещения перебросом, связанный с прогнозированием траектории летящего тела. Рассматриваются соответствующие задачи и подходы к их решению.

**Ключевые слова:** робототехническая система; гибкая производственная система; транспортировка материальных объектов; переброс; захват; прогнозирование траектории.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование, представленное в данном обзоре, является частью более масштабной научно-исследовательской работы, целью которой является разработка нового подхода к транспортировке материальных объектов с помощью робототехнического переброса. Задача транспортировки объектов часто возникает в промышленности, например, когда необходимо переместить обрабатываемый объект от одного станка к другому или на склад. Подходы к этой задаче могут различаться в разных производственных системах в различных ситуациях, и для транспортировки могут использоваться различные средства. Развитие этой области обусловлено растущими требованиями к производительности, качеству и гибкости производственных систем.

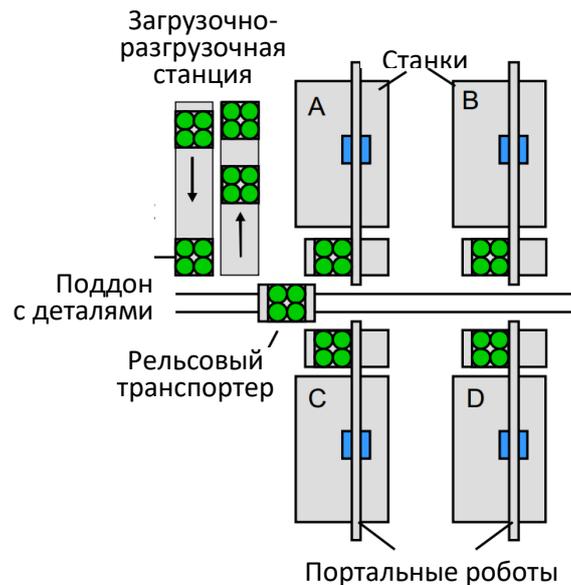
Материал данной статьи организован следующим образом. Первый раздел представляет собой краткое введение в современные системы транспортировки. Во втором разделе дается обзор исследований по транспортировке путем броска и захвата (Transport-by-Throwing, TbT). Исследование, описанное в данной статье, сконцентрировано на одном аспекте системы TbT: прогнозировании траектории летящего тела, этот сложный аспект обсуждается в третьем разделе. В четвертом разделе рассматриваются задачи и предлагаемые подходы к их решению.

## 1 ТРАНСПОРТИРОВКА МАТЕРИАЛОВ

Транспортировка материалов является естественной частью промышленных производственных процессов. Средства производства могут включать станки, которые обрабатывают изделие, рабочих, выполняющих действия, которые не могут выполняться станками, и среду транспортировки (транспортную сеть), которая обеспечивает передачу изделий или их частей между рабочими и станками. История показывает, что объем задач, решаемых рабочими-людьми, уменьшается с развитием промышленных технологий. Массовое производство, являющееся стандартом в промышленных процессах с начала 20-го века (введение массового производства обычно связывают с открытием завода Форда в Хайленд-Парке в 1910 г.), требует

автоматической последовательной транспортировки изделий и деталей между станками и рабочими, которые обрабатывают эти изделия и их части. При полностью автоматическом производственном процессе вся транспортировка и обработка объектов выполняются станками.

Традиционные системы для транспортировки объектов в промышленной среде основаны на различных конвейерах (ленточные конвейеры, винтовые конвейеры, малогабаритные направляющие и т. д.), которые перемещают множество небольших объектов на короткие расстояния, и специальных транспортных средствах, которые транспортируют большие объекты на большие расстояния (рис. 1). В некоторых особых условиях применяются другие методы, например, пневматические трубки. Концепция ТвТ может заменить конвейерные ленты в некоторых конкретных случаях и условиях.



**Рис. 1** Традиционный поток деталей в гибкой производственной системе [2].

Как правило, конвейерная лента занимает значительный объем рабочего пространства завода и определяет расположение станков. Станки размещаются последовательно вдоль производственной линии, связанной с конвейерной лентой. Следует упомянуть следующие свойства конвейерных систем [1]:

- возможность перемещения большого количества деталей: несколько предметов могут транспортироваться лентой конвейера одновременно;
- регулируемая скорость транспортировки может изменяться в соответствии с требованиями станков;
- возможность выделить пространство для временного хранения деталей между станками;
- высокая степень автоматизации при передаче объектов;
- единая среда для передачи объекта между несколькими станками: существует множество станков, обрабатывающих объект вдоль конвейера.

Возрастающий спрос на отдельные изделия и количество вариантов продукции повысили требования к гибкости и скорости транспортировки материалов. Под гибкостью производства в данном случае подразумевается возможность быстрой и несложной реконфигурации производственной среды при изменениях производственного процесса. Эти условия стимулируют развитие альтернативных технологий для транспортировки объектов.

## 2 ТРАНСПОРТИРОВКА ОБЪЕКТОВ ПЕРЕБРОСОМ

Транспортировка перебросом (Transport-by-Throwing, TbT) – это новый подход к транспортировке объектов, предложенный Франком [2]. В настоящее время изучаются возможности использования этого подхода при обработке объектов в промышленности. Системы TbT могут послужить альтернативой конвейерным системам при высокоскоростной транспортировке небольших твердых объектов на короткие расстояния.

Основной принцип TbT заключается в том, что объект выбрасывается метательным устройством из исходной точки в сторону точки назначения и затем ловится устройством захвата в точке назначения. Движение объекта между этими точками следует баллистической траектории, форма которой зависит от силы тяжести и импульса броска.

### 2.1 Обзор идеи перемещения деталей бросанием

Идеи, лежащие в основе подхода TbT, иллюстрируются на рис. 2. Различные станки, обрабатывающие объекты в процессе производства, связаны траекториями бросаемых объектов. Бросающие устройства расположены в начальной точке каждой траектории. В каждом пункте назначения находится устройство захвата. Оно ловит объект в полете и передает его станку для обработки.

Такая система транспортировки имеет ряд отличий от традиционных конвейерных систем:

1) Нет необходимости устанавливать громоздкий конвейер между двумя рабочими станциями. Следовательно, при использовании TbT рабочее пространство завода будет сохранено. Кроме того, нет необходимости физически объединять различные станки.

2) В конвейерных системах один конвейер часто обеспечивает последовательную транспортировку объектов через множество рабочих станций, которые обычно расположены вдоль конвейера. При использовании подхода TbT перемещение объекта между каждой парой последовательных рабочих станций осуществляется по своему собственному маршруту. Если необходимо переместить объект между двумя удаленными друг от друга рабочими станциями, то это может быть сделано с помощью нескольких последовательных бросков. Тем не менее, возможно, чтобы одно бросающее устройство бросало объекты нескольким устройствам захвата, или одно устройство захвата захватывало объекты, брошенные с нескольких бросающих устройств.

3) Нет необходимости размещать станки вдоль прямой линии, как в тех транспортных сетях, которые основаны на конвейерных лентах.

4) Соотношение между скоростью объекта (а также пропускной способностью) и затратами энергии на перемещение может быть намного лучше. Затраты энергии в подходе TbT связаны с приданием импульса объекту при броске и обеспечением движения устройства захвата. В конвейерных системах энергия затрачивается на перемещение конвейерной ленты самой по себе.

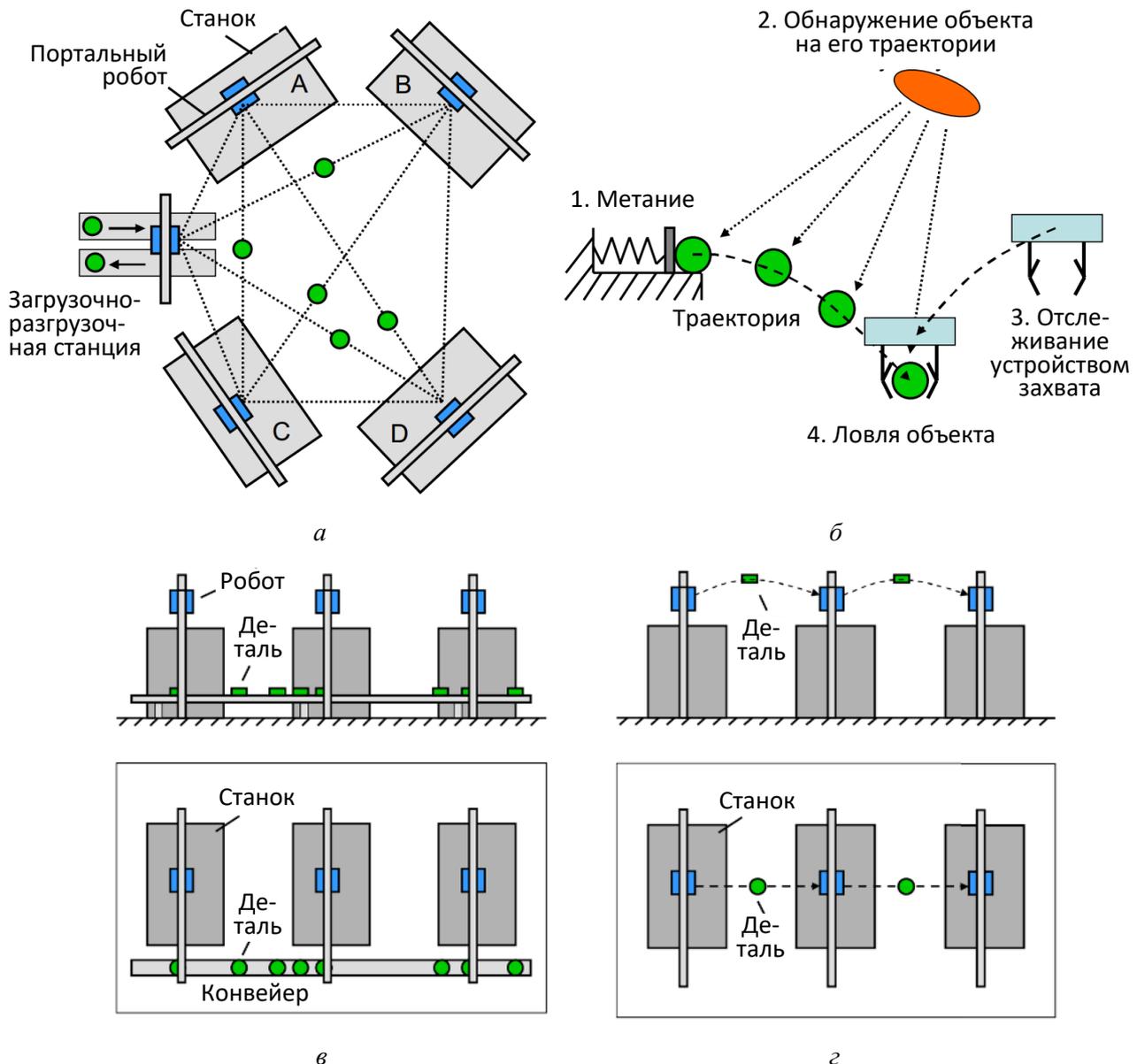
5) Дальность броска ограничена мощностью бросающего устройства.

Результаты, полученные в работах [2–9], показали, что TbT может применяться для транспортировки объектов при следующих условиях:

- размер объекта должен быть около 10 см или меньше. В большинстве экспериментов использовались теннисные мячи [5, 6, 10]; также рассматривались другие малогабаритные объекты [8, 9]. Объект должен быть компактным и достаточно тяжелым, чтобы иметь устойчивую траекторию (например, лист бумаги был бы неприемлемым объектом: он быстро теряет скорость, и его движение становится непредсказуемым);

- дальность броска должна достигать нескольких метров. Увеличение дальности приводит к большему отклонению траектории от планируемой точки перехвата. Следовательно, область захвата расширяется с увеличением расстояния. Большие расстояния также требуют более высоких скоростей броска и больше свободного пространства для траекторий объекта;

• скорость броска может достигать 10 м/с. Более высокая скорость приведёт к большим затратам энергии. Скорость броска влияет на максимальное расстояние полёта. Например, бросок теннисного мяча со скоростью 10 м/с и под углом  $\alpha = 45^\circ$  по отношению к горизонту приведёт к полету на расстояние 9 м с максимальной высотой полета 2 м [2]. Высокая скорость при броске на малое расстояние может привести к слишком большой взаимной скорости объекта и устройства захвата в точке пересечения, вследствие этого хрупкие объекты могут быть повреждены при захвате.



**Рис. 2** Пояснение идеи транспортировки перебросом [2]:

*а* – новый подход к перемещению деталей в гибкой производственной системе;

*б* – функциональные зоны перемещения деталей перебросом;

*в* – традиционная транспортировка шестерен конвейером;

*г* – транспортировка шестерен перебросом.

Рассмотрим подробнее процесс переброса объекта из точки  $A$ , где расположен бросающий механизм, в точку назначения  $B$ , где находится устройство захвата. Бросающий механизм кидает устройству захвата идентичные по форме предметы. Основные задачи, возникающие при обеспечении этого процесса, рассмотрены в работе [7, с. 138]:

- траектория объекта в пределах рабочей зоны устройства захвата должна быть определена заранее, чтобы задать траекторию движения устройства захвата (другими словами, необходимо сделать прогноз траектории объекта);
- для прогноза требуются данные о траектории объекта в начале полёта; следовательно, необходимо отслеживать траекторию в реальном времени.

Система, обеспечивающая переброс объектов, в простейшем случае включает два электро-механических прибора (бросающее устройство и устройство захвата), а также компьютерную систему для записи траектории предметов и управления устройством захвата. Она может также включать в себя специализированные контролеры бросающего устройства и устройства захвата, броска и другие дополнительные устройства (например, сенсоры, применяемые для отслеживания траектории объектов).

## 2.2 Задача броска

Задача бросающего устройства – кидать объекты так, чтобы они попадали в рабочее пространство устройства захвата. В идеале бросающее устройство должно быть настроено таким образом, чтобы для каждого броска обеспечивать одинаковые начальные условия (скорость, угол, направление движения объекта).

Первым шагом при построении системы транспортировки перебросом является создание бросающего устройства, которое кидает предметы с допустимой точностью. Это означает, что данное устройство позволит выбрасывать предметы без значительных отклонений в скорости и направлении движения. Если все брошенные предметы попадают в рабочее пространство устройства захвата, выбрасывающее устройство удовлетворяет требованиям. Несколько публикаций связаны с разработкой устройств такого типа и управлением ими, например, [3, 9]. В настоящее время задача совершенствования таких приборов остаётся открытой, но устройства, отвечающие основным требованиям, уже существуют. Такое устройство не может быть идеальным; отклонения при броске будут в любом случае (то есть скорость и направления броска предмета не будут каждый раз одинаковыми). Траектория всегда будет отличаться из-за этих отклонений, а также из-за того, как предмет будет взаимодействовать с воздушным потоком.

Точность броска считается удовлетворительной, если бросок обеспечивает попадание объекта в заданную область. Точный бросок обеспечивает сравнительно малую область, в которой может приземлиться объект. В работах [11–15] робототехнический бросок рассматривается как самостоятельная научная задача. Например, в работе [13] шарики, выброшенные с расстояния 2.5 м, попали точно на участок диаметром 5 см.

## 2.3 Задача захвата

Задачей устройства захвата являются захват объекта и передача его на рабочую станцию для обработки. В работе [2] рассматриваются два способа механического захвата в разделе «жесткий» и «мягкий» захват. При «жестком» способе устройство захвата находится в точке ожидаемого пересечения в ожидании летящего объекта. В этой точке оно захватывает объект. Скорость устройства захвата в этот момент равна нулю; поэтому относительная скорость между объектом и устройством захвата равна скорости объекта. Жесткий захват был реализован в [4] с помощью рамочного декартового робота (Gantry Cartesian Robot), обладающего двумя степенями свободы (возможно перемещение рабочего органа по вертикали и по горизонтали), рабочая плоскость которого перпендикулярна предполагаемой траектории летящего объекта. Предиктор траектории передает данные о предполагаемой точке пересечения траектории объекта с рабочей плоскостью, затем устройство захвата перемещается в эту точку и ждет там объект.

При «мягком» способе устройство захвата имеет большую свободу. Рабочий орган устройства захвата имеет собственную траекторию, которая пересекается с траекторией объекта в точке захвата [16]. При этом объект и рабочий орган оказываются в этой точке в один и тот же момент времени. Траектория устройства захвата определяется таким образом, чтобы относительная скорость объекта и рабочего органа в момент захвата была минимальна. В таком случае перегрузки во время захвата минимальны, и «мягкий» захват можно применять к более хрупким объектам.

Аналогичная классификация способов захвата движущегося объекта человеком уже рассматривалась в [17]. Там способы захвата обозначены как CWOС (Catching WithOut Consideration of shock contact – захват без учета ударного контакта) и CWC (Catching With Consideration of shock contact – захват с учетом ударного контакта); они соответствуют «жесткому» и «мягкому» захвату объекта роботом. Было показано, что для того чтобы поймать движущийся объект, человек может либо переместить руку так, чтобы она могла как можно быстрее достичь объекта (CWOС), либо двигаться таким образом, чтобы минимизировать перегрузку в точке захвата (CWC). Таким образом, концепция «мягкого» захвата может считаться бионической.

Действия устройства захвата зависят от полученной информации о полете объекта. Для получения этой информации используются специальные датчики и программное обеспечение. Требования к алгоритмам отслеживания и задача прогнозирования траектории рассмотрены в подразделе 2.4. После того как точка перехвата определена, необходимо сгенерировать инструкции для устройства захвата. Устройство захвата должно выполнить перехватывающее движение непосредственно перед моментом пересечения траекторий, и это движение не должно повредить ни объект, ни само устройство, ни близлежащие предметы. После успешного захвата робот должен передать объект следующему устройству с необходимой ориентацией. Эта задача также может быть связана с различными сложностями в зависимости от конструкции устройства захвата и типа объекта.

#### **2.4 Отслеживание и прогнозирование траектории**

Объект будет успешно пойман только в том случае, если определена точка в рабочем пространстве устройства захвата, в которой обеспечивается успешный захват при данном броске. Для этого требуются точные и своевременные данные о траектории брошенного объекта. Поэтому необходима сенсорная система для измерения координат объекта в трехмерном пространстве. В большинстве работ, связанных с ТвТ (например, [5, 18–20]), для этого используется система цифровых видеокамер. Может применяться только одна камера, отслеживающая объект с использованием дополнительной информации, получаемой с других датчиков или обусловленной определенными теоретическими допущениями. Например, в работе [5] визуальное отслеживание траектории летящего мяча производится одной камерой, при этом начальная скорость объекта, время и координаты запуска измеряются с помощью инфракрасных барьеров, а дальнейшая траектория объекта восстанавливается с использованием специфической модели движения. Еще одним фактором, который позволяет восстановить пространственные координаты объекта на основе видеоданных с единственной камеры, является точное знание размеров летящего объекта.

Использование стереопары (двух камер, синхронно снимающих одну и ту же область пространства) позволяет восстановить координаты объекта на основе изображений, снятых одновременно двумя камерами. Точность восстановления зависит от параметров камер и от качества алгоритмов обработки видео.

Обработку информации о траектории полета объекта можно разделить на два основных этапа: сбор данных о текущей траектории (отслеживание) и экстраполяция значений параметров в рабочее пространство устройства захвата (прогноз). Эти этапы были описаны как отдельные задачи в подразделе 2.1. В данном подразделе будет рассмотрен первый этап. Прогнозирование траектории является одной из основных тем этого обзора, и поэтому будет рассмотрено более подробно отдельно. Обработка информации о полете объекта может быть разделена на следующие этапы:

1) Наблюдение сцены перед появлением объекта, находящегося в полете. Этот этап начинается, когда бросающее устройство извещает о скором броске.

2) Обнаружение объекта и определение его координат после того, как объект попадает в поле зрения камеры. Система отслеживания должна сначала определить, что объект оказался в поле зрения, затем определить его координаты в трехмерном пространстве.

3) Отслеживание траектории объекта. Этот этап включает сбор данных об изменении координат объекта в течение определенного периода времени. Чтобы повысить точность и производительность алгоритма, на данном этапе можно использовать уже имеющиеся данные о предыдущем движении объекта.

4) Прогнозирование траектории.

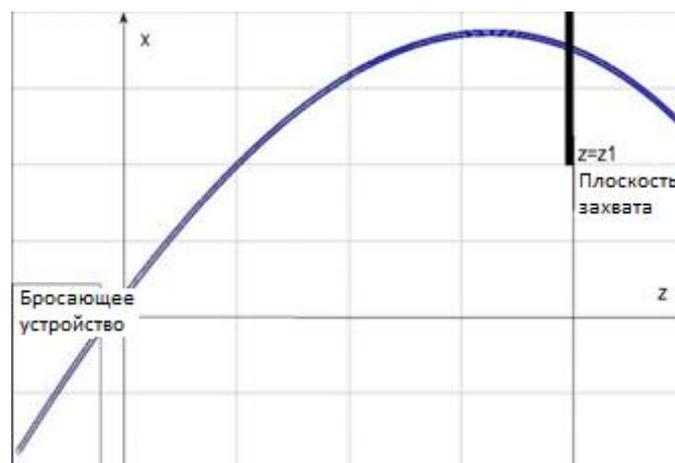
5) Определение точки перехвата, в которой должен выполняться захват.

6) Определение инструкций для устройства захвата.

7) Захват объекта устройством захвата.

Рассмотрим перемещение объекта перебросом в системе координат, которая привязана к бросающему устройству. Устройство захвата и направление силы тяжести расположены, как показано на рис. 3. Здесь  $u$ -размерность перпендикулярна плоскости фигуры. Устройство захвата расположено рядом с пунктом назначения. У него есть некоторое рабочее пространство, где оно может перемещаться в соответствии со своими степенями свободы. Для устройства захвата с двумя степенями свободы, используемого в [4], рабочее пространство будет находиться в пределах плоского прямоугольника, ограниченного величиной рамы. Рабочее пространство для многозвенного робототехнического манипулятора ограничено длинами звеньев и максимальными углами поворотов. Точка захвата должна лежать внутри рабочего пространства устройства захвата. Область пространства, в которой может находиться точка захвата, назовем областью захвата (или Gripping Area – GA). Часть траектории, лежащую внутри GA, назовем траекторией в области захвата – Gripping Area Trajectory (GAT).

Информация о начальной скорости объекта может быть измерена датчиками (например, инфракрасными барьерами в [5]) или оценена на основе обработки видео с камеры.



**Рис. 3** Положение бросающего устройства и плоскости захвата в робототехнической системе переброса объектов с жестким захватом.

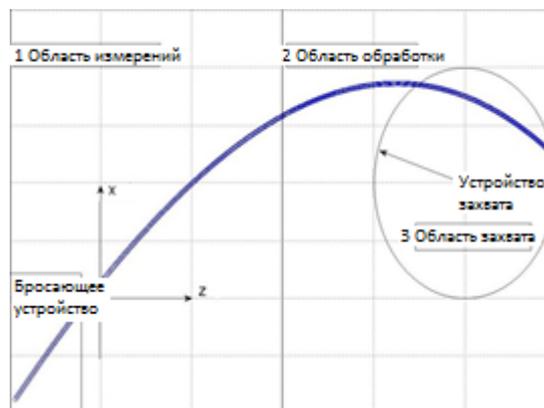
По сути, бросающее устройство отрегулировано так, чтобы каждый раз бросать объект в направлении точки назначения с одной и той же скоростью и под одним и тем же углом к горизонту. Различия между разными траекториями обусловлены случайными отклонениями

начальной скорости и направлением броска, а также непредсказуемым взаимодействием объекта с воздухом. Например, в [21] было показано, что траектория теннисного мяча неустойчива на начальной стадии полета. Пролетев расстояние, приблизительно равное десяти собственным диаметрам, мяч переходит в динамически стабильное состояние, и его траектория от этой точки могла быть спрогнозирована более или менее точно. Таким образом, для прогнозирования необходима информация о траектории объекта после броска.

Набор датчиков (например, синхронизированная стереопара) используется для измерения положения объекта. Камеры должны располагаться таким образом, чтобы обеспечить максимальную точность измерений (если такое положение допустимо конструктивно и при нем можно обеспечить связь с контроллером).

Подобно GA и GAT можно определить область измерения (Measurement Area, MA) и траекторию области измерения (Measurement Area Trajectory, MAT). В этой области, начиная с точки запуска (рис. 4), координаты брошенного объекта измеряет система наблюдения. После того как объект вылетает из этой области, производится прогнозирование его траектории в зоне захвата. Пространство между измерением и областью улавливания можно назвать областью обработки (Processing Area, PA). Пока объект летит через PA, система должна выполнить следующее:

- 1) Обработать данные, полученные от датчиков.
- 2) Спрогнозировать GAT объекта.
- 3) Сгенерировать инструкции для устройства захвата.
- 4) Переместить устройство захвата в точку перехвата.



**Рис. 4** Разделение пространства полета объекта на три области.

Если начальная скорость объекта составляет около 5–10 м/с, а дальность броска 1,5–3 м, то продолжительность полета составит около 0,7–1,5 с [3]. Этот период времени следует разделить на промежутки измерения и обработки, а также время, которое занимает процесс захвата.

Если MA сравнительно велика, это дает некоторые преимущества. Большее количество измерений делает данные более надежными. Чем меньше будет размер «слепой» области обработки, тем меньше будет непредсказуемое отклонение траектории. Значения координат в начале полета будут примерно одинаковы для двух траекторий, даже если в дальнейшем эти траектории значительно расходятся. Следовательно, при малой величине MA значительное отклонение траектории от номинальной в GA должно быть точно предсказано на основе незначительного отклонения в MA. В этой ситуации даже небольшие погрешности измерения могут сильно повлиять на точность прогнозирования. Производительность системы значительно

ограничивает размер области измерения. Время, за которое объект пролетит через РА, не должно быть меньше времени, за которое устройство должно подготовиться к захвату объекта.

Разделение траектории на три части является условным. В действительности измерения могут проводиться даже в рабочей области устройства захвата. Если предиктор достаточно быстр, он может обновлять прогноз после приема каждого нового кадра. Временной сдвиг между моментом, когда делается прогноз, и ожидаемым моментом захвата определяется временем, за которое приводы устройства захвата могут выполнить перехватывающее движение. Следовательно, траектория области обработки (РАТ) может быть определена как часть траектории, соответствующая определенному периоду времени, достаточному, чтобы устройство захвата могло подготовиться к перехватывающему движению, прежде чем объект достигнет рабочего пространства устройства. После того как операция предсказания была выполнена впервые, динамика объекта в МА является входом для предиктора, а динамика объекта в ГА – требуемым выходом. В дальнейшем можно обновлять прогноз и корректировать траекторию устройства захвата на его основе. Однако устройство захвата не может сильно отклоняться от заданной траектории, если оно уже начало двигаться. Следовательно, решение о траектории устройства захвата должно быть принято на основе траектории объекта в МА.

Задачей отслеживания траектории является получение информации о движении объекта через зону измерения. Для этого система должна решить следующие задачи:

1) *Обнаружение*: установить, что объект присутствует на изображении и соответственно пролетает через МА.

2) *Распознавание*: определить положение объекта на изображении. Этот и предыдущий шаг реализуются на основе алгоритма распознавания объектов. Алгоритм должен отличать контур объекта от промышленного фона (который может содержать движущееся оборудование) или определять специфические характеристики объекта. Целью этого этапа является определение пиксельных координат центра масс объекта на изображениях. Это нужно сделать очень быстро, желательно в течение промежутка времени между двумя кадрами.

3) *Позиционирование*: определить положения объекта в пространстве. Необходимо определить мировые координаты центра объекта и ориентацию объекта (если только он не является сферическим).

В режиме трекинга обработка изображений может ускорить позиционирование объекта на текущем изображении, используя данные с предыдущих изображений.

Реальная система ТбТ может содержать ряд дополнительных задач (например, бросание объектов в разных направлениях, захват объектов, брошенных из нескольких источников, транспортировка разнотипных объектов по одному маршруту). В настоящее время нет общей методологии построения столь сложных систем ТбТ. Разработка такой методологии не входит в задачи данного исследования: здесь рассматривается более простой случай ТбТ.

### 3 ЗАДАЧА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ

Задача прогнозирования траектории при жестком перехвате для ситуации, рассмотренной в [5], имеет следующий вид: необходимо определить значения координат  $y$  и  $z$  при  $x = x_{\text{grasp}}$  (используется нотация из 2). В момент захвата устройство захвата должно быть зафиксировано в точке с координатами  $x_{\text{grasp}}$ ,  $y_{\text{grasp}}$ ,  $z_{\text{grasp}}$  в ожидании объекта. Параметры движения устройства захвата не зависят от скорости и ориентации объекта в точке захвата, поэтому прогнозирование этих параметров не является необходимым условием для успешного захвата. В существующих исследованиях в рамках проекта ТбТ задача прогнозирования ориентации брошенного объекта плохо изучена, потому что бросаемые объекты в основном являются сферическими. Точность прогнозирования времени пересечения объекта с плоскостью  $x_{\text{grasp}}$  должна быть минимально необходимой, чтобы успеть переместить рабочий орган в точку захвата.

Мягкий захват требует более сложной процедуры прогнозирования траектории, так как скорость и направление движения рабочего органа в момент захвата должны быть близки к скорости и направлению движения самого объекта. Перехват должен произойти внутри рабочего пространства, величина которого определяется конструкцией устройства захвата. Чтобы определить инструкции для устройства захвата, необходим прогноз значений следующих параметров движения объекта через рабочее пространство устройства захвата:

- временной интервал движения объекта через ГА: момент  $t_{in}$ , когда он входит в ГА, и момент  $t_{out}$ , когда он покинет ГА, если не будет перехвачен;
- динамика координат центра объекта  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$  для  $t_{in} < t < t_{out}$ ;
- динамика скорости объекта  $v(t)$  для  $t_{in} < t < t_{out}$ ;
- динамика ориентации для объекта сложной формы.

Задача состоит в том, чтобы определить наиболее вероятные значения этих параметров. Стоит обратить внимание, что более или менее точная информация о скорости может быть получена путем дифференцирования зависимости координат от времени. Расчет прогноза основан на данных о предыдущей траектории объекта. В литературе описаны три подхода к прогнозированию траектории для роботизированного захвата:

- 1) Точная настройка метательного устройства [9]: прогноз вообще не используется.
- 2) Захват в реальном времени [22–25]: траектория устройства захвата определяется текущим положением летящего объекта. Прогноз либо не используется вовсе, либо используются очень простые модели.
- 3) Долгосрочное прогнозирование [19, 26–29].

По сути, бросающее устройство отрегулировано так, чтобы каждый раз бросать объект в направлении точки назначения с одной и той же скоростью и под одним и тем же углом к горизонту. Различия между разными траекториями обусловлены случайными отклонениями начальной скорости и направления броска, а также непредсказуемым взаимодействием объекта с воздухом. Например, теннисный мяч, отбитый ракеткой спортсмена, динамически неустойчив в начале полета, и его траектория может отличаться от номинальной формы. Однако после пролета пути длиной примерно в десять его диаметров он становится динамически стабильным, и его полет может быть более или менее точно оценен аэродинамической моделью [21].

Захват в реальном времени используется, когда робот способен перемещаться со скоростью, сравнимой со скоростью объекта. Для такого захвата требуется использование высокоскоростной измерительной системы. Например, в [22] была предложена специальная система технического зрения, обеспечивающая обратную связь в течение 1 мс; впоследствии она была применена для робототехнического захвата в [30]. Эта стратегия продемонстрировала свою действенность в экспериментах, однако если расстояние, пролетаемое объектом, велико, и робот не может среагировать вовремя, она бесполезна.

Алгоритмы прогнозирования траектории летящего объекта были представлены в ряде работ, например [5, 26, 27, 31, 32]. Процент успешных захватов достигал 80 в [31]. В основном были использованы аналитические модели прогнозирования.

Основной подход к прогнозированию траектории летающего тела заключается в моделировании физики баллистического полета. Чтобы задать модель движения объекта, брошенного под углом к горизонту, необходимо определить силы, действующие на этот объект. Эти силы рассмотрены в работе [33; с. 68–108]. Наиболее важные из них кратко описаны ниже:

- 1) *Гравитация*: Направлена вниз и может быть рассчитана с помощью хорошо известной формулы:

$$F_{\text{grav}} = m g,$$

где  $m$  – масса объекта (если объекты одинаковые, значение массы можно считать константой);  $g$  – ускорение свободного падения (оно является постоянным для географического региона и не имеет больших отклонений на Земле). Все остальные нижеперечисленные силы обусловлены взаимодействием между объектом и воздухом.

2) *Соппротивление воздуха*: если полет является дозвуковым и происходит в земной тропосфере, значение сопротивления можно считать пропорциональным квадрату скорости объекта  $v$ :

$$F_{\text{drag}} = kv^2.$$

Коэффициент  $k$  здесь зависит от ряда параметров: размера объекта, его формы и ориентации, числа Рейнольдса, температуры и влажности воздуха и т. д. Коэффициент  $k$  можно вычислить аналитически только для объектов простой формы (гладкая сфера, гладкий параллелепипед и т. д.), для тел более сложной формы его измеряют при продувке в аэродинамических трубах.

3) *Подъемная сила, боковая сила и индуктивное сопротивление*: эти силы связаны с несимметричным обтеканием несимметричного тела воздухом. Из-за этого эффекта давление на разные точки летящего тела различается. Эта разница вызывает силу, действие которой приводит к отклонению траектории. На этом эффекте основан полет самолета. В авиации принято отдельно рассматривать три компонента этой силы: подъемная сила (направленная вверх), боковой компонент (направленная в сторону) и компонент сопротивления, или индуктивное сопротивление (направленное назад), но природа этих сил одна и та же. При исследовании аэродинамики крыла самолета, как правило, рассматриваются только подъемная сила и индуктивное сопротивление, но для объекта произвольной формы сила может действовать в разных направлениях.

4) *Соппротивление следа*: эта сила связана с образованием вихревой дорожки позади летящего тела при турбулентном обтекании. Воздух позади объекта разделяется на несколько вихрей, которые увеличивают резистивное воздействие воздуха на летающий объект.

5) *Эффект Магнуса*: это эффект, который возникает, когда летящий объект вращается. Обусловленная им сила может состоять из вертикального, горизонтального и бокового компонентов.

6) *Другие эффекты, связанные с обтеканием объекта воздухом*: для компактных объектов влиянием эффектов, связанных с обтеканием (частные случаи этих эффектов – подъемная сила, индуктивное сопротивление, сопротивление следа и эффект Магнуса), можно пренебречь. Для простых тел в специфических условиях сила может быть измерена либо рассчитана с помощью специальных уравнений. В общем случае точно определить влияние этих эффектов не представляется возможным.

7) *Влияние внешнего воздушного потока, ветра*: если имеется постоянный поток воздуха, то его воздействие на траекторию нужно учесть. Влияние случайных потоков воздуха в помещении непредсказуемо и может рассматриваться как стохастическое.

Создание точной модели полета объекта произвольной формы в общем случае является частую слишком сложным. В литературе по робототехническому захвату, как правило, рассматривается только влияние силы тяжести [26, 34] и сопротивления воздуха [27, 18]. Другие факторы принимаются за шум. Однако можно сказать, что объективные физические законы движения тела, брошенного под углом к горизонту, существуют, и при одинаковых начальных условиях две траектории не будут сильно отличаться. Фраза «одинаковые начальные условия» означает, что форма объекта, точка и направление броска, начальная скорость одинаковы, а также нет существенной разницы в потоке воздуха. Моделирование взаимодействия объекта с воздухом в полете является вычислительно сложной задачей, поэтому актуальной задачей является разработка такого метода прогнозирования траектории, который позволил бы учитывать действие описанных аэродинамических сил, не требуя точного знания их значений.

Большинство существующих подходов к робототехническому захвату брошенных объектов основаны на моделях движения, которые учитывают гравитацию и лобовое сопротивление (например, [27, 18]). Доля успешных захватов в таких системах колеблется от 66 [27] до 80% [26, 35].

#### 4 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ОБУЧЕНИЯ

Большинство людей могут успешно прогнозировать траекторию полета брошенного объекта интуитивно. Способность человеческого мозга решать эту задачу проверена рядом видов спорта, таких как теннис, бадминтон, бейсбол, настольный теннис, волейбол, сквош и др. Игроки этих видов спорта должны быстро оценить зону приземления летящего мяча. Единственным источником информации для оценки при этом является визуальное наблюдение за полетом мяча. Это наблюдение не связано со стереовидением: расстояние до мяча во много раз больше, чем между глазами, следовательно, нет заметной разницы между положением объекта с точки зрения левого и правого глаза. Фактически решение принимается на основании угла подъема летящего объекта [36]. Эта задача аналогична задаче робототехнического захвата брошенного мяча на основе данных видеонаблюдения.

Как правило, дети могут играть в спортивные игры уже в довольно раннем возрасте. Большинство детей способны играть в бадминтон и волейбол уже в начальной школе, то есть намного раньше, чем они начинают изучать физику. Аэродинамические свойства тел, брошенных под углом к горизонту, обычно не входят в школьную программу. Теоретические знания не нужны для того, чтобы ловить мяч. Люди учатся оценивать траекторию полета мяча, запоминая предыдущий опыт. Возможность людей интуитивно оценивать траекторию мяча – яркий пример прогнозирования по аналогии, поэтому утверждение о возможности такого прогнозирования иногда называют «теоремой о ловле мяча». Под этим названием принцип бионического прогнозирования по аналогии может применяться и в других научных областях, например, для прогнозирования потребления электричества [37].

В предыдущих разделах были описаны следующие направления развития ТвТ-систем: технологии бросания объекта, отслеживание траектории, определение точки перехвата, определение действий устройства захвата и, в дальнейшем, разработка более сложных сетей транспортировки объектов робототехническим перебросом. Определение точки перехвата (основанное на прогнозе ГАТ) необходимо для обеспечения успешной транспортировки. Несовершенство бросающего устройства и взаимодействие объекта со средой делают невозможным полет всех объектов по одинаковой траектории, следовательно, устройство захвата должно подстраивать свою траекторию под траекторию объекта, чтобы наверняка поймать его. Движения устройства захвата основаны на результатах прогнозирования. В свою очередь, прогнозирование основывается на визуальном трекинге. Визуальный трекинг движущихся (в том числе летящих) объектов был исследован во многих научных работах. Трекинг и восстановление координат объекта из видеоданных в рамках ТвТ-систем были рассмотрены в диссертации [38]. Аппаратное и программное обеспечение для трекинга выбирается таким образом, чтобы дать точную информацию о координатах на вход предиктора траектории.

Данное исследование нацелено на разработку алгоритма прогнозирования траектории. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи.

1) *Анализ структуры и точности данных трекинга*: входные данные системы прогнозирования представляют собой последовательность измеренных координат объекта; следовательно, для точного прогноза необходимо точное измерение этих координат. Пространственные координаты объекта определяются на основе разработанного алгоритма анализа изображений с камер. При этом возникают ошибки вследствие неточности алгоритма анализа изображений. Чтобы снизить влияние этих ошибок, разработан алгоритм статистической оценки результатов измерения координат объекта. Сложность разработки такого алгоритма состоит в том, что конкретная зависимость координат от времени остается неизвестной и не может быть аппроксимирована с помощью точных и простых функций.

2) *Разработка алгоритма прогнозирования траектории*: мотивацией для решения этой задачи стала необходимость точного прогнозирования для успешной транспортировки объектов робототехническим переносом. До настоящего времени для этого использовались предикторы, основанные на моделировании физики брошенного объекта. Однако, как показано выше,

уровень точности прогнозирования таких моделей ограничен. Следовательно, необходима альтернативная техника прогнозирования.

3). *Построение системы, которая позволит реализовать данные подходы*, то есть интеграция алгоритма в работающую систему робототехнического перехвата брошенных объектов. Для оценки качества прогноза необходимо реализовать полноценную систему робототехнического переброса объектов, поскольку предиктор непрерывно взаимодействует с другими компонентами системы.

Основная идея предложенного метода прогнозирования траектории состоит в прогнозировании по аналогии. При таком прогнозировании измеренные параметры предыдущих траекторий (динамика координат объекта в МА и GA) хранятся в базе данных. Поскольку процесс полета подчиняется законам физики, информация, собранная на основании предыдущих полетов, может быть использована для построения прогностической модели. Процесс построения такой модели известен как «обучение на основе прецедентов». Он аналогичен тому, как люди учатся выполнять различные действия (например, ловить мяч). Обучение на прецедентах – самый распространенный метод машинного обучения.

Задача обучения может быть определена более точно следующим образом: пусть  $X$  – множество возможных входных данных задачи;  $Y$  – множество возможных выходных решений;  $y^*: X \rightarrow Y$  – неизвестное отображение множества  $X$  на множество  $Y$ . Значения этого отображения известны только для конечной обучающей выборки, состоящей из  $m$  примеров

$$L = X^M = \{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_m, Y_m)\}.$$

На основе обучающей выборки необходимо создать алгоритм  $a: X \rightarrow Y$ , который позволяет вычислить  $y$  не только для  $x$  из подмножества  $\{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ , но для любых возможных  $x$  из множества  $X$ . Это означает, что алгоритм обучения должен иметь возможность получать общее знание (зависимость) из частного (примеров). В задаче прогнозирования траектории измеренная часть траектории рассматривается как  $X$ , а часть траектории в рабочем пространстве устройства захвата рассматривается как  $Y$ .

В зависимости от характера  $Y$  выделяют два распространенных типа задач обучения:

- *классификация*: множество возможных  $Y$  конечно;
- *регрессия*:  $Y$  – числовая функция (множество возможных  $Y$  бесконечно).

Особой разновидностью регрессии является прогнозирование временных рядов, когда нам нужно предсказать будущие значения определенной функции на основе ранее наблюдаемых значений. Очевидно, что предсказание траектории брошенного объекта относится к задачам прогнозирования временных рядов. Для случая задачи прогнозирования траектории  $X$  – начальная часть траектории, измеренная наблюдателем,  $Y$  – часть траектории в рабочем пространстве устройства захвата, которая должна быть предсказана. Это означает, что  $X$  – это последовательность измерений координат объекта с метками времени (а также измерений его скорости и ориентации, если это можно и нужно), а  $Y$  – ожидаемая зависимость координат объекта от времени в зоне захвата.

Программное обеспечение для прогнозирования включает два алгоритма: предиктор и алгоритм обучения. Задача предиктора состоит в том, чтобы определить  $Y$  из  $X$  с использованием известной модели прогнозирования. Задачей алгоритма обучения является построение модели прогнозирования для предиктора. Это означает создание алгоритма на основе набора  $X^m$ .

Методологически это исследование состоит из следующих этапов:

1) *Анализ точности и производительности системы наблюдения*: основан на экспериментах по бросанию объектов и измерению их траектории. Цель анализа состоит в том, чтобы определить состав и правдивость данных, которые являются входными для предиктора.

2) *Разработка алгоритма прогнозирования траектории на основе машинного обучения, а также алгоритма обучения*. Эти алгоритмы разрабатываются параллельно, поскольку они сильно связаны друг с другом.

3) *Оценка точности построенной модели* состоит из двух этапов. На первом этапе проводится имитационное моделирование полета тела, брошенного под углом к горизонту. Параметры модели определяются на основе информации о физике летящего тела, точности используемой системы наблюдения и отклонениях используемых бросающих устройств. На втором этапе строится большая база реальных траекторий объекта. Примеры из этой базы используются для обучения и валидации предиктора.

4) *Внедрение предложенного модуля прогнозирования в существующую систему*: данный этап включает оценку скорости вычислений в рамках построенной модели и создание ее версии, работающей в реальном времени.

5) *Окончательная оценка всей траектории с помощью интегрированного алгоритма прогнозирования*: этот шаг включает в себя эксперименты по захвату брошенных объектов и оценке доли успешных захватов. Для этих экспериментов создается работоспособная модель предиктора.

Разработка и проверка предлагаемых подходов могут быть осуществлены с использованием теннисного мяча в качестве бросаемого объекта. Аэродинамические свойства теннисного мяча исследованы в ряде научных работ [21, 39, 40–42]. Большинство существующих систем робототехнического захвата брошенных объектов также предназначены для ловли небольших спортивных мячей, например [5, 27, 30, 31]. Модели полета таких тел позволяют точно предсказать траекторию (что используется, например, в [19]) и могут быть использованы для доказательства точности других алгоритмов. Поэтому использование этого объекта предпочтительно в плане сравнения предлагаемых идей с существующими решениями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, Transport-by-Throwing (ТbТ) представляет собой подход к построению сетей для транспортировки материальных объектов в промышленности. С момента появления этого подхода были опубликованы посвященные ему работы, в которых решались основные проблемы, возникающие при реализации данного подхода. Задача захвата объекта в полете с помощью робототехнического манипулятора была исследована в ряде работ еще до появления ТbТ. В этих работах задача рассматривалась как относящаяся к теоретической робототехнике, ориентированной на понимание и улучшение возможностей робототехнических систем. Прогнозирование траектории относится к задачам прогнозирования временных рядов. Прогнозирование временных рядов – это широкая область исследований в прикладной математике. В этой области созданы различные модели. Некоторые из них базируются на известных зависимостях, некоторые – на статистических свойствах данных, в то время как другие основаны на аналогии и обучении.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность профессору Дитмару Дитриху (Dietmar Dietrich) и коллеге Мартину Понграцу (M. Pongratz) – лидерам исследовательского проекта «транспортировка бросанием» в Техническом университете Вены, а также профессорам Л. Р. Черняховской, В. В. Васильеву, М. Б. Гузаирову, Р. А. Мунасыпову и Г. Р. Шахмаметовой из Уфимского университета науки и технологий за полезные замечания и поддержку.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Sule, D. R.: Manufacturing Facilities: location, planning, and design. Third edition. CRC Press, Boca Raton, 2009.
2. Frank, H., Wellerdick-Wojtasik, N., Hagebeueker, B., Novak, G., Mahlknecht, S.: Throwing Objects: a bio-inspired Approach for the Transportation of Parts, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Kunming, China, pp. 91 to 96, December 2006.
3. Pongratz, M., Pollhammer, K., Szep, A.: KOROS Initiative: Automatized Throwing and Cathcing for Material Transportation, ISoLA 2011 Workshops, pp. 136 to 143, 2012.

4. Frank, H., Barteit, D., Meyer, M., Mittnacht, A., Novak, G., Mahlkecht, S.: Optimized Control Methods for Capturing Flying Objects with a Cartesian Robot, IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Chengdu, China, pp. 160 to 165, September 2008.
5. Frank, H.: Design and Simulation of a Numerical Controlled Throwing Device, Second Asia International Conference on Modeling and Simulation AICMS 08, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 777 to 782, May 2008.
6. Barteit, D., Frank, H., Kupzog, F.: Accurate prediction of interception positions for catching thrown objects in production systems, IEEE International Conference on Industrial Informatics. Daejeon, Korea, pp. 893 to 898, July 2008.
7. Pongratz, M., Pollhammer, K., Szep, A.: KOROS Initiative: Automatized Throwing and Catching for Material Transportation, ISoLA 2011 Workshops, pp. 136 to 143, 2012.
8. Frank, T., Janoske, U., Schroedter, C.: Detection of Position and Orientation of Flying Cylinder Shaped Objects by Distance Sensors, IEEE International Conference on Mechatronics, Istanbul, Turkey, pp. 1623 to 1629, April 2011.
9. Frank, T., Janoske, U., Mittnacht, A., Schroedter, C.: Automated Throwing and Capturing of Cylinder-Shaped Objects, IEEE International Conference on Robotic and Automation, Saint Paul, Minnesota, USA, pp. 5264 to 5270, May 2012.
10. Frank, H.: Design and Simulation of a Numerical Controlled Throwing Device, Second Asia International Conference on Modeling and Simulation AICMS 08, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 777 to 782, May 2008.
11. Miyashita, H., Yamavaki, T., Yashima, M.: Learning Control Method for Throwing an Object More Accurately with One Degree of Freedom Robot, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Montréal, Canada, pp. 397 to 402, July 2010.
12. Kober, J., Peters, J.: Learning Elementary Movements Jointly with a Higher Level Task, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA, pp. 338 to 343, September 2011.
13. Nemeč, B., Vuga, R., Ude, A.: Exploiting Previous Experience to Constrain Robot Sensorimotor Learning, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Bled, Slovenia, pp. 727 to 732, October 2011.
14. Zhang, Y., Luo, J., Hauser, K.: Sampling-based Motion Planning with Dynamic Intermediate State Objectives: Application to Throwing, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Saint Paul, Minnesota, USA, pp. 2551 to 2556, May 2012.
15. Kang, H., Park, F. C.: Humanoid Motion Optimization via Nonlinear Dimension Reduction, IEEE International Conference on Robotics and Automation. River Centre, Saint Paul, Minnesota, USA, pp. 1444 to 1449, May 2012.
16. Pongratz, M., Mironov, K. V., Bauer F.: A soft-catching strategy for transport by throwing and catching, Vestnik UGATU, Vol. 17, No. 6(59), pp. 28 to 32, December 2013.
17. Kajikawa, S., Saito, M., Ohba, K., Inooka, H.: Analysis of Human Arm Movement for Catching a Moving Object, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 698 to 703, October 1999.
18. Barteit, D., Frank, H., Pongratz, M., Kupzog, F.: Measuring the Intersection of a Thrown Object with a Vertical Plane, IEEE International Conference on Industrial Informatics, Cardiff, UK, pp. 680 to 685, June 2009.
19. Pongratz, M.: Object Touchdown Position Prediction, Diploma Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Vienna University of Technology, September 2009.
20. Pongratz, M., Pollhammer, K., Szep, A.: KOROS Initiative: Automatized Throwing and Cathcing for Material Transportation, ISoLA 2011 Workshops, pp. 136 to 143, 2012.
21. Cooke, A. J.: An Overview of Tennis Ball Aerodynamics, Sports Engineering, No. 3 2000, pp.123 to 129, February 2000.
22. Ishii, I., Nakabo, Y., Ishikawa, M.: Target Tracking Algorithm for Ims Visual Feedback System Using Massively Parallel Processing, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 2309 to 2314, April 1996.
23. Namiki, A., Nakabo, Y., Ishii, I., Ishikawa, M.: High Speed Grasping Using Visual and Force Feedback, IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, USA, pp. 3195 to 3200, May 1999.
24. Imai, Y., Namiki, A., Hashimoto, K., Ishikawa, M.: Dynamic Active Catching Using a Highspeed Multifingered Hand and a High-speed Vision System, IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orlean, USA, pp. 1849 to 1854, April 2004.
25. Furukawa, N., Namiki, A., Taku, S., Ishikawa, M.: Dynamic Regrasping Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, USA, pp. 181 to 187, May 2006.
26. Hove, B., Slotine, J.-J.: Experiments in Robotic Catching, American Control Conference, Boston, USA, pp. 381 to 386, June 1991.
27. Frese, U., Baeuml, B., Haidacher, S., Schreiber, G., Schaefer, I., Haehnle, M., Hirzinger, G.: On-the-Shelf Vision for a Robotic Ball Catcher, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, Hawaii, USA, pp. 591 to 596, November 2001.
28. Birbach, O., Frese, U., Baeuml, B.: Realtime Perception for Catching a Flying Ball with a Mobile Humanoid, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, pp. 5955 to 5962, October 2010.
29. Baeuml, B., Schmidt, F., Wimboeck, T., Birbach, O., Dietrich, A., Fuchs, M., Friedl, W., Frese, U., Borst, C., Grebenstein, M., Eiberger, O., Hirzinger, G.: Catching Flying Balls and Preparing Coffee: Humanoid Rollin'Justin Performs Dynamic and Sensitive Tasks, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, pp. 3443 to 3444, May 2011.
30. Namiki, A., Ishikawa, M.: Robotic Catching Using a Direct Mapping from Visual Information to Motor Command, IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taipei, Taiwan, pp. 2400 to 2405, September 2003.
31. Birbach, O., Frese, U., Baeuml, B.: Realtime Perception for Catching a Flying Ball with a Mobile Humanoid, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, pp. 5955 to 5962, October 2010.
32. Kim, S., Billard, A.: Estimating the non-linear dynamics of free-flying objects, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 60, pp. 1108-1122, June 2012.
33. Karman, T. von: Aerodynamics. Selected Topics in the Light of Their Historical Development, Cornell University Press, Ithaca, New York, March 1954.

34. Herrejon, R., Kagami, S., Hashimoto, K.: Position Based Visual Servoing for Catching a 3-D Flying Object Using RLS Trajectory Estimation from a Monocular Image Sequence, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guilin, China, pp. 665 to 670, December 2009.
35. Baeuml, B., Wimboeck, T., Hirzinger, G.: Kinematically Optimal Catching a Flying Ball with a Hand-Arm-System, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, pp. 2592 to 2599, October 2010.
36. Gillies, M. F. P., Dodgson, N. A.: Ball Catching: An Example of Psychologically-based Behavioural Animation, Eurographics UK 17th Annual Conference, Cambridge, UK, pp. 229 to 236, April 1999.
37. Mao, A.: Ball Catching: The Inspiration to Power System Stability Control, A Fast Algorithm for the Generator's Disturbed Trajectory Prediction, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, Florida, USA, pp. 1 to 7, June 2007.
38. Akhter, N.: Visual Tracking of Mechanically Thrown Objects with Planar Surfaces, Dissertation, Faculty of Electrical Engineering, Vienna University of Technology, September 2011.
39. Achenbach, E.: Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds number, Journal of Fluid Mechanics, No. 54, pp. 565 to 575, August 1972.
40. Stepanek, A., The aerodynamics of tennis balls – the topspin lob, American Journal of Physics, No. 56, pp.138 to 142, February 1988.
41. Chadwick, S. G., Haake, S. J.: The drag coefficient of tennis balls, International Conference on the Engineering of Sport, Sydney, Australia, pp. 169 to 176, June 2000.
42. Mehta, R., Alam, F., Subic, A.: Review of tennis ball aerodynamics, Sports technology review, John Wiley and Sons Asia Pte Ltd, 2008, No. 1, pp. 7 to 16, January 2008.

*Поступила в редакцию 28 мая 2023 г.*

#### МЕТАДАННЫЕ / METADATA

**Title:** Transport-by-Throwing — a robotic method of moving objects by through: discussion of a scientific and technical problem.

**Abstract:** Throwing objects is a promising way to robotically transport parts in flexible manufacturing systems. This review considers the tasks associated with the implementation of this approach. A brief introduction to modern transportation systems discusses the shortcomings of the traditional conveyor approach. An overview of research on transportation by throwing and grabbing (Transport-by-Throwing, TbT) is given. An important aspect of the transfer motion related to the prediction of the trajectory of a flying body is discussed. The corresponding problems and approaches to their solution are considered.

**Key words:** robotic systems; transportation of material objects; transfer; capture; trajectory prediction.

**Язык статьи / Language:** русский / Russian.

#### Об авторах / About the authors:

##### МИРОНОВ Константин Валерьевич

ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Россия.

Ст. науч. сотр. центра когнитивного моделирования. Дипл. спец. по защите инф-и (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2012). PhD (Техн. ун-т Вены, 2016). Иссл. в обл. робототехники, применения искусственного интеллекта в технических системах.

E-mail: mironovconst@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4828-1345>

URL: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?authorid=939814](https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=939814)

##### MIRONOV Konstantin Valeryevich

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Russia.

Senior researcher, Center of Cognitive Modelling. Information Security Specialist (Ufa State Aviation Tech. Univ., 2012). PhD (Vienna University of Technology, 2016). Robotics and Intelligent Control.

E-mail: mironovconst@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4828-1345>

URL: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?authorid=939814](https://elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=939814)