

# TRANSPORT-BY-THROWING — РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРЕДМЕТОВ ПЕРЕБРОСОМ: ОБЗОР ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МЕТОДОВ

К. В. Миронов

**Аннотация.** Перемещение предметов перебросом — это перспективный способ робототехнической транспортировки деталей в гибких производственных системах. В данном обзоре анализируются известные методы, используемые при реализации данного подхода. В плане аэродинамики баллистического движения приводятся общие сведения, рассматриваются соответствующие вопросы оружейной баллистики и аэродинамики летательных аппаратов; результаты исследования аэродинамики спортивных мячей и сходных объектов. Обозреваются подходы к статистической оценке баллистических кривых. Рассматриваются результаты в области визуального отслеживания (трекинга) движущихся объектов: захват движения с помощью прикрепленных к объекту датчиков; использование структурированного света и времяпролетных сенсоров; монокулярного зрения; стереовидения. Обсуждаются подходы к робототехническому захвату и транспортировке перебросом: бросок и захват; транспортировка броском; сравнение подходов. Рассматриваются вопросы прогнозирования траектории в данной задаче: захват без предсказания; прогнозирование с использованием физических моделей, с помощью нейронной сети; с помощью алгоритма ближайших соседей.

**Ключевые слова:** робототехническая система; транспортировка; переброс; захват; статистическая оценка баллистических кривых; трекинг движущихся объектов; алгоритм ближайших соседей.

## ВВЕДЕНИЕ

Как было показано ранее [Мир24], Transport-by-Throwing (ТбТ) представляет собой подход к построению сетей для транспортировки материальных объектов в промышленности. С момента появления этого подхода в 2006 г. [Fra06], были опубликованы ряд посвященных ему работ, в которых решались основные проблемы, возникающие при реализации данного подхода. Задача захвата объекта в полете с помощью робототехнического манипулятора исследовалась в ряде работ еще до появления ТбТ. 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 — широкой области 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. Цель данного обзора — проанализировать известные методы, применяемые при решении основных задач ТбТ. Раздел 1 содержит анализ и обобщение сведений об аэродинамических свойствах подбрасываемых объектов. В следующих двух разделах говорится о некоторых аспектах оценки траектории на основе измерений. В разделе 2 рассматривается ситуация, когда известна зависимость координат летящего тела от времени. Также рассмотрены способы, интеграции данных в модель процесса (например, как отфильтровать ошибочные измерения и улучшить точность измерения). В разделе 3 рассматриваются технические и алгоритмические проблемы отслеживания баллистических траекторий и восстановления трехмерных координат по данным с системы наблюдения. Также рассмотрены различные технологии, обеспечивающие наблюдение за сценой и отслеживание движущихся целей. Цель

раздела 4 – дать обзор современных систем для робототехнического бросания и захвата объектов, а также возникающих в таких системах задач (в частности, задач отслеживания полета объектов и прогнозирования траекторий). Этот обзор включает исследования в рамках подхода ТвТ, но не ограничивается ими. Некоторые аспекты, связанные с прогнозированием, кратко обсуждаются в этом разделе в связи с задачей захвата объекта и обеспечением перехватывающего движения манипулятора.

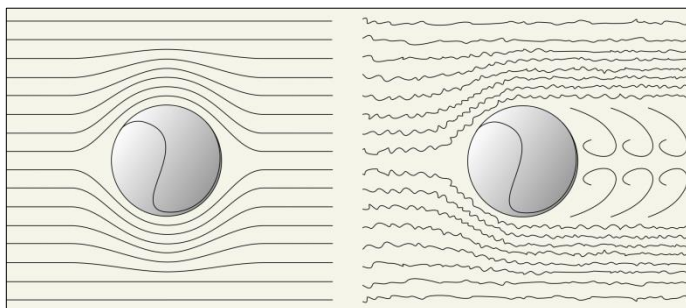
## 1. АЭРОДИНАМИКА БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Влияние аэродинамических сил исследуется в работах, посвященных баллистическому движению конкретных объектов, форма которых определяется приложениями. Наиболее хорошо изученные баллистические объекты – это пули и снаряды, а также летательные аппараты. Другие объекты менее исследованы. Среди объектов, по свойствам близких к объектам ТвТ, неплохо изучены аэродинамические свойства малых спортивных мячей (используемых для тенниса, настольного тенниса, гольфа). Под «объектами ТвТ» в данном случае понимаются жесткие, компактные тела размером до десяти сантиметров, которые не имеют высокой парусности (например, лист бумаги не является приемлемым объектом ТвТ).

### 1.1. Общие сведения

Поведение тел в полете первым исследовал Ньютон; он открыл закон всемирного тяготения, предложил первые модели для сопротивления воздуха (в дальнейшем эти модели были отвергнуты [Kar54, с. 61]) и заметил, что траектория вращающегося объекта искривлена. В настоящее время эти три эффекта по-прежнему считаются наиболее значимыми для летящего тела дециметрового диаметра: гравитация, сопротивление воздуха и эффект Магнуса. Большинство работ, посвященных аэродинамике спортивных мячей и рассмотренных ниже, учитывают влияние этих трех сил. В некоторых работах (например, [Ala98]) рассматриваются три аэродинамические силы: лобовое сопротивление, подъемная сила и боковая сила. В этих работах «лобовое сопротивление» – это сопротивление воздуха, направленное назад, «подъемная сила» – это компонент, направленный вверх, а «боковая сила» – это компонент, перпендикулярный горизонтали проекции скорости. «Подъемная сила» здесь связана с эффектом Магнуса и имеет другую природу в отличие от подъемной силы, действующей на крыло самолета. Основным источником боковой силы является также эффект Магнуса.

Теоретическое представление о сопротивлении воздуха основано на моделировании взаимодействия летящих объектов с воздухом на основе специальных разделов механики жидкостей и газов. Область воздуха вблизи летящего тела, в которой воздух и тело влияют друг на друга, называется пограничным слоем. Движение воздуха вокруг объекта может быть ламинарным или турбулентным (рис. 1).



**Рис. 1** Ламинарное (слева) и турбулентное (справа) обтекание сферического объекта, движущегося в воздухе.

В ламинарном режиме пространство вокруг объекта можно разделить на набор виртуальных «трубок» или «подслоев». Газ внутри подслоя движется с определенной скоростью и не выходит за его пределы. Такие подслои огибают объект, не пересекаясь друг с другом. При турбулентном обтекании объект разрушает структуру подслоев, которые перемешиваются, и движение газа становится хаотичным.

В турбулентном режиме воздух позади объекта искривляется в серию

вихрей, называемую вихревой дорожкой Кармана [Kar54, с. 101]. Как упоминалось ранее, вихревой след является дополнительным источником сопротивления. Однако вязкость воздуха играет ограниченную роль после перехода от ламинарного обтекания к турбулентному; по этой причине значение сопротивления уменьшается после перехода [Gof13, Kar54].

Движение жидкости в пограничном слое может характеризоваться безразмерным числом Рейнольдса,  $Re$ , которое определяется следующим образом:

$$Re = \frac{vD}{\nu} = \frac{vD\rho}{\mu}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость объекта;  $D$  – характеристическая длина (для сферических объектов равна диаметру) и  $\nu$  – кинематическая вязкость, рассчитанная на основе вязкости  $\mu$  и плотности воздуха  $\rho$ . Для сферических объектов известной формы и размера в воздухе при известной температуре и влажности  $Re$  зависит только от скорости объекта. Когда число Рейнольдса низкое, обтекание является ламинарным. При более высоких значениях обтекание становится турбулентным. Переход от ламинарного обтекания к турбулентному (и соответствующее падение значения сопротивления воздуха) при определенных значениях  $Re$  называется «кризисом сопротивления» [Gof13, с. 141]. Переход не является мгновенным процессом. Постепенность перехода к турбулентности связана с ростом турбулентной области позади летящего тела.

Если обтекание объекта является ламинарным, сила сопротивления определяется вязкостью воздуха. Для летящих объектов размером более нескольких микрон поток будет турбулентным, а вязкость можно игнорировать [Kar54, с. 100]. Турбулентность воздушного потока вблизи стандартных летящих мячей подтверждена экспериментами, например, в [Ala10]. Для вычисления сопротивления в этом случае применяется следующая формула, называемая уравнением сопротивления:

$$F_{\text{drag}} = \frac{1}{2} SC_d \rho v^n. \quad (2)$$

Здесь  $v$  – скорость объекта;  $\rho$  – плотность воздуха;  $C_d$  – коэффициент сопротивления, зависящий от формы (например, для сферы  $C_d = 0.47$ );  $S$  – параметр, характеризующий фронтальную площадь тела; для продолговатых тел он может быть вычислен следующим образом:

$$S = V^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

где  $V$  – объем объекта. Характеристическая площадь сферы равна площади ее поперечного сечения:

$$S = \pi R^2, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус сферы. Значение  $n$  зависит от условий полета (например, для полета в воздухе со сверхзвуковой скоростью  $n = 1$ , для кораблей в воде  $n = 3/4$ ). Для объекта, летящего по воздуху на дозвуковой скорости, лобовое сопротивление пропорционально квадрату скорости<sup>1</sup>, то есть  $n = 2$ .

Для большей наглядности уравнение (2) можно заменить следующим:

$$F_{\text{drag}} = kv^2, \quad (5)$$

где коэффициент  $k$  определяется как произведение коэффициентов из (2):

$$k = \frac{1}{2} SC_d \rho. \quad (6)$$

Помимо  $k$  и  $C_d$ , «коэффициентом сопротивления» твердых тел может именоваться так называемый баллистический коэффициент  $C_b$ . Для продолговатых объектов он может быть рассчитан с помощью следующего уравнения [Wei80, с. 722]:

$$C_b = \frac{m}{c_b S} = \frac{\rho l}{c_d}, \quad (7)$$

<sup>1</sup> The drag equation, NASA, <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation>.

где  $m$  – масса тела;  $C_d$  – коэффициент сопротивления;  $S$  – характеристическая площадь тела;  $\rho$  – плотность тела;  $l$  – его длина. Баллистический коэффициент отражает способность объекта сохранять скорость во время полета. Он используется для характеристики аэродинамических свойств объекта, например, в [Wei80, Far02].

Движение тела только под действием силы тяжести может быть выражено следующим дифференциальным уравнением:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}'' = \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – координаты объекта в системе координат, где  $x_1$  коллинеарен направлению силы тяжести. Если начальная скорость  $v(0) = \begin{bmatrix} v_1(0) \\ v_2(0) \\ v_3(0) \end{bmatrix}$ , то уравнение (8) будет иметь следующее решение:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1(0) \\ v_2(0) \\ v_3(0) \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{t^2}{2}, \quad (9)$$

где  $t$  – период времени после запуска. Эта модель описывает движение объекта в вакууме. Для полета в воздухе она не является точной; тем не менее она была успешно применена для прогнозирования траектории объекта, например, в [Nov91, Her09]. Попытка добавить сопротивление в дифференциальное уравнение (8) приведет его к следующему виду:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}'' = \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{1}{2} S C_d \rho \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}' \sqrt{(x_1'(t))^2 + (x_2'(t))^2 + (x_3'(t))^2}. \quad (10)$$

Модель движения, основанная на этом уравнении, является одной из самых часто используемых для робототехнического захвата, например, в [Fre01, Var08, Bir11]. В отличие от (8) это уравнение не имеет аналитического решения и на практике обычно решается численными методами, например, методом Рунге–Кутты в [Var08].

Эффект Магнуса возникает, когда объект вращается. Для сферических объектов он может описываться формулой, аналогичной формуле лобового сопротивления [Gof13, с. 138]:

$$F_m = \frac{1}{2} S C_l^* \rho v^2. \quad (11)$$

Здесь  $C_l^*$  – динамический коэффициент, зависящий от скорости вращения объекта, остальные обозначения аналогичны уравнению сопротивления. Коэффициент  $C_l^*$  мало применим на практике, поскольку зависит от скорости вращения объекта. Зачастую удобнее использовать другой вид уравнения [Gof13, с. 139]:

$$F_m = \frac{1}{2} S C_l \rho r \omega v, \quad (12)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $r$  – радиус сферы;  $C_l$  – статический коэффициент силы Магнуса.  $C_l$  и  $C_l^*$  связаны следующим уравнением [Gof13, с. 138]:

$$C_l^* = \frac{C_l v}{r \omega}, \quad (13)$$

Сила Магнуса сонаправлена векторному произведению  $\omega$  и  $v$  [Gof13, с. 139]. Она может раскладываться на следующие компоненты: сопротивление Магнуса (направлено назад), подъемная сила Магнуса (направлена вверх) и боковая сила Магнуса (направлена вбок). Бросающие устройства могут бросать объекты без вращения. При использовании таких

устройств эффект Магнуса можно игнорировать. Аппроксимация координат объекта плоскостью показала, что, хотя летящий мяч вращается, никакого искривления траектории боковой силой Магнуса не было обнаружено.

## 1.2. Оружейная баллистика и аэродинамика летательных аппаратов

Полет пуль и снарядов изучает оружейная баллистика. Траектории выстрелянных снарядов начали исследовать раньше траекторий других брошенных тел; первые изыскания выполнил в XVI в. Никколо Тарталья. Именно он определил, что траектория снаряда представляет собой кривую, а не состоит из двух прямых. С тех пор наши знания о свойствах летящих снарядов существенно расширились. Значительная часть в области общей баллистики была получена именно при изучении оружейных снарядов и их траекторий. Развитие навесной стрельбы, а затем использование баллистических ракет в XX в. увеличило наши знания о баллистических кривых. Однако современная оружейная баллистика малоприменима для моделирования полета объектов при робототехнических бросках и захватах по нескольким причинам:

1. Снаряд вылетает из орудия на сверхзвуковой скорости более 500 м/с. Физика сверхзвукового движения совершенно иная, чем дозвукового (например, сопротивление воздуха пропорционально первой степени скорости, а не второй) [Kar54, с. 108–147].

2. Форма снаряда такова, что он имеет устойчивую траекторию. В приложениях ТбТ форма объекта может быть различной.

3. Высокая точность попадания снаряда обусловлена высокой точностью орудия, определяемой его устройством.

4. Прикладная оружейная баллистика не рассматривает наблюдение за летящим снарядом как средство определения его траектории. Обычно используется вероятностная модель определения зоны попадания, в зависимости от точности орудия. При робототехническом же захвате прогноз зоны попадания должен быть точным.

В любом случае баллистические снаряды и их отслеживание являются хорошо исследованной предметной областью; некоторые аспекты, которые могут быть особенно полезны для ТбТ, рассматриваются в разделе 2.

Специфическая область баллистики связана с исследованием стрел и копий. Сегодня стрелы и копья чаще используются в спорте, а не как оружие. В отличие от пуль и ракет стрелы и копья летают на дозвуковых скоростях. Классическая спортивная стрельба из лука осуществляется прямой наводкой с целью поразить стрелой мишень. Траектория стрелы рассматривается, скорее, как прямая, чем как кривая. Аэродинамические исследования полета стрелы связаны с определением коэффициентов сопротивления при различных скоростях и критических значений  $Re$  для стрел. Стандартная скорость стрелы составляет около 60 м/с [Gof13, с. 143]. Таким образом, полет стрелы мало похож на полет объекта ТбТ.

С другой стороны, спортивные копья бросаются под углом примерно в  $30^\circ$  к горизонту и со скоростью около 30 м/с. Лучшие спортсмены могут докинуть его до отметки 100 м, причем результаты засчитываются только в случае, если копьё касается земли наконечником<sup>2</sup>. Спортивное копьё имеет длину 2.2–2.7 м и массу около 0.6–0.8 кг [Gof13, с. 143], то есть оно существенно больше, чем объекты ТбТ. При максимальном диаметре древка 2.5–3 см копьё является продолговатым объектом. При полете копьё возникает продольный момент, поскольку центр массы не совпадает с центром давления [Hub87]. Кроме того, копьё вибрирует во время полета, что влияет на сопротивление [Hub89]. Эти факторы показывают разницу между копьём и компактным объектом, который могут перебрасывать роботы.

Баллистические траектории самолетов и планеров также являются хорошо изученной областью аэродинамики. Развитие таких машин началось с планеров, предложенных и построенных Джорджем Кэли в 1809–1853 гг. Разнообразие современных планеров варьируется от очень маленьких объектов весом несколько килограммов до орбитальных многоразовых

<sup>2</sup> Athletics discipline – Javelin – Disciplines – IAAF, <http://www.iaaf.org/disciplines/throws/javelin-throw>.

пусковых установок (космических шаттлов и кораблей класса «Буран»), которые используют принцип планирования при посадке. Планеры и самолеты отличаются от предметов, которые могут быть объектами робототехнического переброса, следующими особенностями:

1. Самолеты конструируют таким образом, чтобы на них действовала высокая подъемная сила. Это достигается за счет специфической формы крыльев. Объекты ТвТ, как правило, не имеют крыльев и в полете не испытывают существенного влияния подъемной силы.

2. Летательные аппараты обладают большими линейными размерами, поэтому воздушный поток вблизи летящего самолета существенно отличается от обтекания мелких объектов.

3. Планеры используют восходящие потоки, чтобы продлить свой полет. В промышленной среде восходящие потоки не играют существенной роли.

4. Самолеты оснащены двигателями, в то время как брошенный объект не имеет дополнительного источника импульса во время полета.

5. Скорости самолетов обычно намного более высокие, зачастую сверхзвуковые.

### 1.3. Исследование аэродинамики спортивных мячей и сходных объектов

Изучение аэродинамики более мелких объектов также имеет место в связи с практическими приложениями. Значительная часть таких исследований связана с индустрией спорта. Аэродинамические условия, сходные с ТвТ, могут быть найдены в спортивных состязаниях, которые включают метание объектов. Это связано с тем, что многие спортивные объекты имеют подходящие параметры, например, мячи, используемые в большом теннисе, настольном теннисе, гольфе, бейсболе, сквоше. Исследования этих объектов проводятся для определения значимых параметров, которые позволяют повысить качество производимых мячей и подтвердить или опровергнуть характеристики, заявленные производителями мячей [Ala10]. Исследование аэродинамических сил, влияющих на поведение мячей, может быть выполнено путем наблюдения за ними, когда они выбрасываются в свободный полет по аэродинамической трубе [Dav49] или путем точного измерения сил с помощью монтажного оборудования (если объект жестко закреплен в аэродинамической трубе) [Ala10].

Исследование полета спортивных мячей обычно выполняется в условиях, подобных тем, которые имеют место во время игры. Эти условия могут существенно отличаться от условий ТвТ. Например, во время игры теннисный мяч летит со скоростью несколько десятков метров в секунду на расстояние более двадцати метров. Мячи для гольфа летят еще дальше и при более высоких скоростях. Также спортивные мячи зачастую вращаются в полете, следовательно, эффект Магнуса необходимо учитывать.

Исследование аэродинамики теннисного шара было начато Ньютоном в 1672 г. и продолжено в ряде научных работ. Краткий обзор этих работ представлен в [Meh08]. Изучение аэродинамики теннисных мячей дало следующие результаты:

– Значения коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы были получены эмпирически при наличии и отсутствии вращения [Ste88, Meh08]. Было обнаружено, что коэффициент сопротивления вращающегося шара увеличивается за счет центробежного расширения пуха. Коэффициент сопротивления обычно колеблется от 0.55 до 0.65 [Meh08].

– Было показано, что число Рейнольдса не оказывает существенного влияния на коэффициент сопротивления летящего мяча [Ste88, Meh08].

– Теннисный мяч быстро достигает стабильного аэродинамического состояния после того, как отбит ракеткой: на расстоянии примерно 10 его диаметров [Coo00].

– Пух на шаре увеличивает коэффициент сопротивления по сравнению с гладким шаром [Cha00].

– Шов на шаре не оказывает существенного влияния на его траекторию [Meh08].

– Увеличение размера мяча не приводит к значительному увеличению коэффициента сопротивления. Приращение сопротивления пропорционально приращению эффективной площади, так как оно определяется уравнением (2) [Meh08].

– Если мяч истерт, его коэффициент сопротивления ниже [Goo00].

– Влияние вязкости примерно в 50 раз меньше влияния лобового сопротивления и может быть проигнорировано [Ach72, Meh08].

– Подъемная сила, связанная с эффектом Магнуса, появляется, когда мяч вращается под определенным углом, в соответствии с теорией [Meh08].

Мячи для настольного тенниса не подвергались столь подробному изучению. Экспериментальное исследование мячей для настольного тенниса в качестве аэродинамических объектов было проведено в [Non10]. Мяч выбрасывался из катапульты со скоростью от 6.2 до 6.5 м/с. Расстояние полета в данном эксперименте составляло около 1.6–1.8 м, что соответствует размеру стола для настольного тенниса. Движение шара наблюдалось сложным набором визуальных датчиков в двух областях: области подачи и области приземления. Для изучения свойств полета объекта в области подачи использовались высокоскоростные камеры (900 кадров в секунду). Процесс посадки регистрировался камерами с более низкой скоростью (150 кадров в секунду). Эксперименты показали, что математическая модель, которая не учитывает аэродинамические силы, неприменима для прогнозирования траектории. Расстояния между расчетными и измеренными позициями составляли до нескольких десятков сантиметров.

Для моделирования траектории с учетом влияния лобового сопротивления и эффекта Магнуса использовалось следующее уравнение:

$$m\ddot{p} = mg - \frac{1}{2}C_d \rho A \|\dot{p}\| \dot{p} + \frac{4}{3}C_m \pi \rho r^3 \omega \dot{p}, \quad (14)$$

где  $m$  – масса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность воздуха;  $A$  – характеристическая площадь;  $r$  – радиус;  $C_d$  – коэффициент лобового сопротивления;  $C_m$  – коэффициент подъемной силы;  $p$  – координаты мяча;  $\omega$  – угловая скорость вращения.

Первое слагаемое в этой формуле соответствует влиянию силы тяжести, второе – воздушному сопротивлению, а третье учитывает влияние вращательной подъемной силы, вызванной эффектом Магнуса. Было показано, что скорость вращения летящего шара более или менее стабильна во время полета. Модель показала среднюю погрешность 4 см и 9 см, при отсутствии и наличии вращения. В [Non10] этот уровень точности был сочтен достаточным для робототехнического настольного тенниса, и более точные модели не разрабатывались.

Мяч для гольфа покрыт ямочками и сделан из металла. По сравнению с теннисным мячом, он тяжелее и не имеет пушистого внешнего слоя. Изучение аэродинамических свойств мячей для гольфа имеет долгую историю. Они были тщательно рассмотрены в работе [Dav49], где представлены результаты, полученные в аэродинамической трубе. Более новые результаты для аэродинамики мячей для гольфа представлены в [Ala10]. В этих работах в основном изучается влияние вращения на траекторию объекта. Результаты схожи с теми, которые описаны выше для теннисных мячей. Мяч для гольфа обладает аэродинамическими свойствами, похожими на свойства гладкой сферы, но все же отличается от нее. В то время как теннисный мяч отличается от гладкой сферы наличием пуха на его поверхности [Cha00, Soo00] и эластичностью [Soo08], мяч для гольфа отличается от гладкой сферы наличием ямочек.

Также существуют исследования аэродинамики бейсбольных мячей. Например, в диссертации [Ala98] рассматриваются аэродинамические свойства вращающегося бейсбольного мяча. Анализ показал, что различные эксперименты ([Wat87], [Bri59]), проводившиеся с целью определения зависимости между скоростью вращения мяча и величиной подъемной силы (т. е. силы, связанной с эффектом Магнуса), дают противоречивые результаты [Ala98, с. 32].

В экспериментах, проведенных в [Ala98], для наблюдения траектории использовался набор камер. Затем при последующей обработке видеоданных были исследованы аэродинамические свойства шара.

Также в ряде работ исследовалась аэродинамика крупных спортивных мячей: футбольного [Asa07, Bar09a, Gof09], баскетбольного [Qin13], волейбольного [Asa10] и мяча для регби [Ala08]. Они мало похожи на потенциальные объекты подхода TbT, особенно на нынешнем этапе развития подхода, что обусловлено их размерами и наличием полости, поэтому они не будут подробно рассматриваться. В работах, посвященных таким объектам, выполнено:

- определение критического числа Рейнольдса [Asa07];
- измерение и вычисление коэффициента сопротивления [Asa07, Bar09a, Gof09, Ala10];
- измерение и вычисление значений силы Магнуса [Asa07, Gof09, Ala08];
- определение влияния ориентации швов на направление скорости [Bar09a];
- визуализация воздушного потока вблизи летящего мяча (использовалась суспензия тетрахлорида титана, а полет наблюдался камерами с частотой 4500 кадров в секунду в [Asa07]);
- сравнение с гладкими сферами [Asa07, Bar09a];
- определение зависимости аэродинамических параметров от угла наклона (для мячей регби) [Ala08].

Визуализация воздушного потока в [Asa07] позволяет определить влияние вихревой дорожки Кармана. Эти результаты являются значимыми, но не могут быть применены к объектам с другим линейным размером. Сам метод потенциально может быть использован для определения влияния кармановского сопротивления в будущем.

Изучение мячей для регби представляет особый интерес, поскольку они не являются сферическими. Экспериментальное моделирование, представленное в [Ala08], сопровождалось некоторыми упрощающими допущениями, например, мяч для регби рассматривался как параболоид, что не совсем правильно. Мяч для регби слишком велик, чтобы его можно было рассматривать на нынешнем этапе развития концепции ТбТ. В [Ala08] было показано, что коэффициент лобового сопротивления увеличивается с увеличением угла рыскания. График зависимости коэффициента сопротивления от угла рыскания выглядит как синусоида с минимумом при нулевом угле и максимумах при углах, равных  $\frac{\pi}{2}$  и  $-\frac{\pi}{2}$ .

Исследования аэродинамики объектов, не связанных со спортом, также представлены в литературе. Например, Lucero [Luc87] исследовал движение тел, имеющих форму параллелепипеда при дозвуковых скоростях, рассмотрев при этом влияние числа Рейнольдса, угла атаки и угла поворота. Актуальность исследования контейнеров обуславливалась потенциальной возможностью их использования при транспортировке радиоактивных материалов в космонавтике. Были проведены статические (объект жестко закреплен в аэродинамической трубе) и динамические (объект закреплен, но может колебаться) испытания устойчивости. Результаты приведены ниже:

- Число Рейнольдса мало влияет на статическую устойчивость объекта. Критические значения не были достигнуты в ходе статических испытаний на дозвуковых скоростях.
- Увеличение числа Рейнольдса снижает динамическую устойчивость объекта; он начинает колебаться хаотично.
- Доказано уменьшение коэффициентов сопротивления с увеличением закругленности фаски.
- Увеличение закругленности фаски увеличивает сопротивление и силу Магнуса при угле атаки до 60 градусов. При более высоких углах влияние на сопротивление противоположное.
- Увеличение закругленности фаски позволяет сместить переход от ламинарного обтекания к турбулентному в более высокие значения  $Re$ .

В различных экспериментах в аэродинамической трубе измерялись коэффициенты «сопротивления», «подъема» и «боковой силы» для диска, хоккейной шайбы и фрисби [Gof13]. Воланы, используемые в бадминтоне, также исследовались в рамках спортивной аэродинамики [Pos09]. Традиционные воланы делаются из гусиных перьев; современные – из пластика. Воланы для бадминтона легче и обладают большей парусностью, чем теннисные мячи. В профессиональных соревнованиях его бросают со скоростью до 70–115 м/с [Pos09,4], что выше, чем скорость любого другого спортивного снаряда. Скорость приземления волана составляет около 6.8 м/с [Pos09, Che09]. После удара ракеткой волан полностью меняет направление полета, пролетев расстояние от 20 до 80 см [Pos09]. При этом он теряет около половины своей скорости. Коэффициенты сопротивления у синтетических воланов ниже, чем перьевых, не обнаружено существенного изменения коэффициента сопротивления при значениях  $Re$  от 13 000 до 200 000 (для сферических мячей такие значения превышают критический порог) [Coo96].



Анализ аэродинамики малых твердых объектов подтверждает утверждение: законы движения брошенного объекта существуют, но величины конкретных параметров этого движения оценить трудно. Полет под действием силы тяжести и аэродинамических сил является более или менее детерминированным процессом, который происходит, согласно физическим законам. Тщательное и комплексное изучение аэродинамических свойств тела простой формы позволяет определить эти правила и вычислить коэффициенты уравнений. Тем не менее аэродинамическая модель включает эффекты, влияние которых может быть определено только экспериментально. Известны случаи, когда эксперименты в сходных условиях привели к различным, а иногда и взаимоисключающим результатам (например, [Wat87] и [Ala98, с. 104]). Следовательно, создание физических моделей, основанных на экспериментах, не гарантирует точности прогнозирования, достаточной для применения, в рамках концепции ТбТ.

Наиболее значимыми аэродинамическими эффектами, влияющими на спортивные мячи, являются лобовое сопротивление и эффект Магнуса. Определить влияние эффекта Магнуса сложнее, чем определить влияние сопротивления. В большинстве работ по аэродинамике спортивных мячей рассматриваются крученые мячи. В рамках концепции ТбТ можно бросать объект без вращения и считать, что эффект Магнуса на него не влияет. Эксперименты по бросанию мяча линейным бросающим устройством, проведенные в Венском технологическом университете, не выявили значимую боковую силу, связанную с эффектом Магнуса.

Анализ аэродинамических моделей движения сферы с точки зрения их применимости в ТбТ был проведен в [Pon09]. Были проанализированы три модели:

1. Полиномиальная модель: движение объекта в каждом измерении выражается полиномом второго порядка:

$$\begin{aligned}x_1 t &= A_1 + B_1 t + C_1 t^2, \\x_2 t &= A_2 + B_2 t + C_2 t^2, \\x_3 t &= A_3 + B_3 t + C_3 t^2,\end{aligned}\tag{15}$$

где  $A_1; A_2; A_3; B_1; B_2; B_3; C_1; C_2; C_3$  – весовые коэффициенты, которые оцениваются на основе имеющихся измерений траектории. Это единственная модель из трех, которая учитывает влияние эффекта Магнуса [Pon09, с. 41].

2. Модель «гравитация – сопротивление»: в данной модели уравнение (10) решается методом малых приращений. Функция координат объекта от времени не задана; поэтому аппроксимация данной моделью производится путем определения методом Монте-Карло параметров полета (начальное положение и начальные векторы скорости, коэффициент сопротивления  $k = \frac{1}{2} SC_d \rho$ , вектор силы тяжести) [Pon09, с. 42].

3. Модель с допущением о независимости компонент сопротивления в различных пространственных измерениях. Используя это предположение, векторное дифференциальное уравнение (10) заменяется набором из трех скалярных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}x_1''(t) &= -kx_1'(t)^2 + g, \\x_2''(t) &= -kx_2'(t)^2, \\x_3''(t) &= -kx_3'(t)^2,\end{aligned}\tag{16}$$

которые имеют следующие решения:

$$\begin{aligned}x_3(t) &= x_3(0) + \frac{1}{k} \ln \frac{\cosh(\sqrt{gk}(t-t_0))}{\cosh(\sqrt{gk}(t_0))}, \\x_2(t) &= x_2(0) + \frac{1}{k} \ln(1 + kx_2'(0)t), \\x_1(t) &= x_1(0) + \frac{1}{k} \ln(1 + k * x_1'(0)t),\end{aligned}\tag{17}$$

где  $t_0 = \frac{1}{\sqrt{gk}} \arctg\left(\sqrt{\frac{k}{g}} x_1'(0)\right)$ .

Сравнение этих методов в [Pop09] показало, что наилучшая точность прогнозирования достигается при использовании третьей модели (верхняя граница доверительного интервала для ошибки прогнозирования в 99% случаев составляет 44 мм для модели «гравитация – сопротивление», 44 мм для полиномиальной модели и 29 мм для модели с независимыми координатами [Pop09, с. 61]). Работа [Pop09] показала, что модели, основанные на влиянии силы тяжести и воздушного сопротивления, достаточно точны, чтобы представлять и прогнозировать баллистическое движение сферических объектов, даже если объекты вращаются.

## 2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ КРИВЫХ

Результаты, рассмотренные в разделе 1, в основном были получены при экспериментах в аэродинамических трубах с использованием высокоточного измерительного оборудования и широко известных методов расчета. Когда дело касается измерений и расчетов необходимых для отслеживания и прогнозирования траектории, появляются несколько дополнительных вопросов. Как можно провести эти измерения? Насколько они будут точны? Можно ли вычислительными средствами повысить точность? В разделе 3 рассмотрены технические и алгоритмические вопросы измерения баллистических траекторий с помощью визуальных датчиков. В этом разделе рассматривается ситуация, когда измеренные координаты брошенного объекта в зависимости от времени уже известны.

Измерения, сделанные камерами или другими датчиками, обычно содержат ошибки. Чтобы уменьшить влияние неточности измерения на дальнейшие расчеты, проводится процедура статистической оценки. Задача оценки траекторий баллистических объектов пришла из военного дела. Радары, используемые для определения местоположения движущейся в воздухе цели (включая баллистические ракеты и снаряды), имеют определенную погрешность определения местоположения, которую стараются свести к минимуму за счет статистической обработки данных. Чаще всего статистическая оценка используется для отслеживания, чтобы определить наиболее вероятное местоположение объекта в текущий момент. Оценка основывается на наборе текущих и прошлых измерений. Задача по восстановлению всей траектории при этом не ставится – определяются физические параметры полета в данный момент, а именно: скорость, ускорение, угловая скорость и т.д. Эти параметры также могут использоваться для прогнозирования будущей точки захвата. В [Cha80, Wei80] фильтрация данных на основе метода наименьших квадратов использовалась для измерения углов падения наземными камерами [Cha80] и измерения скорости доплеровскими датчиками [Wei80]. В этих работах рассматривался полет объектов за пределами земной атмосферы, то есть сопротивление воздуха не учитывалось, а сила тяжести зависела от высоты. Эти результаты показали применимость метода наименьших квадратов для различных моделей движения.

Использование фильтра Калмана впервые было рассмотрено для отслеживания баллистического полета в [Jaz70] – через девять лет после того, как фильтр был предложен Калманом [Kal61]. В [Far02] представлено сравнение нелинейных фильтров, в частности, были исследованы расширенный фильтр Калмана (Extended Kalman Filter, EKF), ансамблевый фильтр Калмана (Unscented Kalman Filter, UKF), фильтр частиц и статистическая линеаризация (CADET). Рассматривалась задача оценки траектории объекта при входе в атмосферу на основе данных радиолокации. Хотя проблема рассматривалась для межконтинентальной противоракетной обороны и слежения за отработанными спутниками, модель движения была достаточно универсальной. Гравитация и сопротивление считались значимыми силами, в то время как другие факторы были опущены. Предполагалось, что заранее известен баллистический коэффициент  $C_b$  снаряда из уравнения (7). Результаты EKF были лучше, чем у других механизмов оценки. Для проверки статистической точности была получена нижняя граница Крамера–Рао (Cramer–Rao Lower Bound, CRLB) для баллистического отслеживания. Оценки сравнивались в рамках моделирования Монте-Карло. Все четыре фильтра показали статистическую эффективность. Позже работа была распространена на объекты с неизвестным  $C_b$  [Ris03]. В этом случае лучшие результаты были у UKF.

Существует ряд других работ, посвященных отслеживанию баллистических объектов со статистической оценкой. Ниже приведены примеры:

– в работе [She09] рассматривается оценка фильтр Калмана на основе GPS-позиционирования. Оценка подхода была сделана с помощью программного моделирования;

– в работе [Rav10] прогноз точки приземления выполняется на основе радиолокационных измерений. Изучается полет объекта в атмосфере (то есть с учетом сопротивления). Введен фильтр множественных моделей. В модель движения включено влияние гравитации, сопротивления и вращения. Моделирование используется для проверки результатов;

– в работе [Yua12, Yua14] также представлен подход, основанный на использовании нескольких моделей. Рассмотрены две части траектории: траектория разгона и баллистическая. Основными рассматриваемыми силами являются гравитация, сопротивление, тяговое ускорение [Yua12], а также ветер [Yua14]. Каждая модель рассматривает некоторое значение коэффициента лобового сопротивления. Вычисляется правдоподобие каждой модели, и наиболее правдоподобный результат принимается в качестве выходных данных. Оценка проводилась с использованием реальных данных измерений;

– в работе [Yao08] используется фильтр Калмана, и предлагается алгоритм ослабления памяти, который позволяет уменьшить расхождение. Результаты были проверены моделированием;

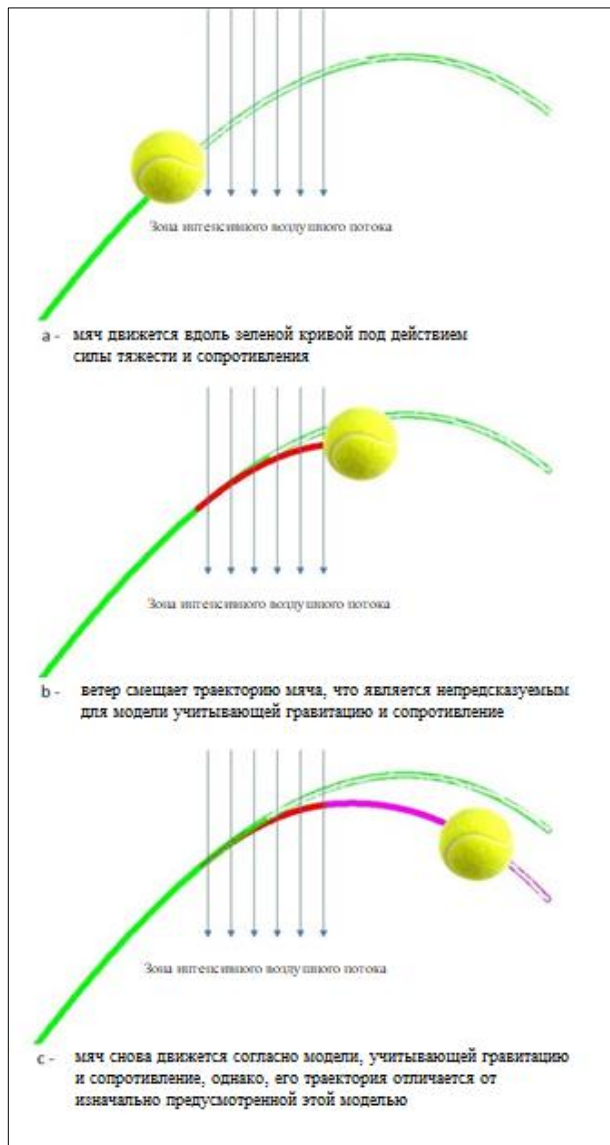
– в работе [Kra05] использовалась концепция нейронного ЕKF (то есть нейронная сеть, обученная алгоритмом ЕKF). Эта модель также была проверена моделированием;

– в работе [Zar00] проведено исследование спирального баллистического снаряда. Применялись линейный и удлиненный фильтр Калмана.

Вышеупомянутые работы были нацелены на прогнозирование баллистической траектории на основе измерений, содержащих ошибки. В следующих разделах данной статьи показано, что при робототехническом захвате с прогнозированием траектории, основанным на моделировании физики полета, часто используются аналогичные механизмы для уменьшения количества ошибок (например, ЕKF в [Fre01, Bar08], метод наименьших квадратов в [Pop09]). Однако применение таких подходов недостаточно для точного долгосрочного прогнозирования, поскольку линейные и полиномиальные модели движения неточны. Более сложные модели трудно встроить в структуру KF, они требуют большого количества памяти и временных ресурсов.

Неточность модели при оценке траектории часто рассматривается как внешнее возмущение, то есть реальное изменение координат объекта, которого модель не ожидает. Например, если объект летит через область с интенсивным воздушным потоком, он меняет свою траекторию, чего не ожидает модель, учитывающая гравитацию и сопротивление воздуха. Как только объект покидает область, модель снова становится правдоподобной (рис. 2). Здесь для визуализации рассматривается случай очень сильного ветра. В реальной робототехнической среде влияние внешних возмущений невелико, и неудачные захваты в основном связаны с погрешностями измерения и несовершенством робототехнической системы [Kim14]. Внешние возмущения необходимо отличать от погрешностей измерения, при которых имеет место ошибка измерения координаты, в то время как реального отклонения от модели нет.

Если модель, используемая для точного прогнозирования, недостаточно точна, отклонение траектории из-за ее неточности можно рассматривать как результат внешнего возмущения. Это не совсем правильно с аналитической точки зрения, но может быть удобно в вычислительном отношении. Для долгосрочного прогнозирования такой подход приведет к увеличению погрешности прогноза по мере увеличения расстояния. С другой стороны, для краткосрочного прогнозирования достаточно даже очень простых физических моделей (например, [Ira04]). Это приводит к мысли, что механизмы оценки для физических моделей могут быть полезны для уменьшения влияния погрешности измерения на коротких расстояниях. Упрощенная модель может использоваться на этапе обработки измерений для уменьшения влияния погрешностей, но не на этапе долгосрочного прогнозирования.



**Рис. 2** Пример внешнего возмущения: отклонение траектории объекта в зоне интенсивного воздушного потока.

ров по фильтру Калмана более значительны, чем ошибки экстраполяции. Ранее в [Nel05] нелинейная регрессия с LS-оценкой рассматривалась для той же задачи. Влияние лобового сопротивления здесь также не рассматривается. В [Cha14] применен ЕKF на основе упрощенной модели. Траектория рассматривается как последовательность прямых восхождений объекта. В [Ben08] оценка на основе метода максимального правдоподобия (MLE) используется для создания модели траектории, которая позволяет определить как точку запуска, так и точку назначения.

Исследования статистической оценки баллистических кривых в первую очередь рассматривают несколько различных типов статистических фильтров: фильтр Калмана с различными модификациями (расширенные и ансцентные фильтры Калмана), метод максимального правдоподобия и метод наименьших квадратов. Применимость этих моделей зависит от характера процесса. Фильтры Калмана нуждаются в построении точной модели шума, а метод наименьших квадратов – точной модели процесса [Ril02, с. 124]. Эти современные реализации требуют тщательной оценки. Многие из них были получены экспериментально на основе моделирова-

В связи с такой возможностью задача восстановления траектории на основе аппроксимации измерений, содержащих ошибки, становится интересной для подхода. Эта задача становится необходимой, когда требуется определить точку запуска объекта на основе измерений. В этом случае внешние возмущения обычно очень невелики (значительные внешние возмущения делают невозможным точное определение точки запуска), и используются более точные модели движения.

Необходимость определения точки запуска объекта проявляется в ряде областей, например, при определении положения снайпера во время контртеррористических операций [Win12]. Такое позиционирование основано на измерениях радиолокатора, оцененных методом наименьших квадратов. В этом случае даже простая линейная модель (без учета каких-либо физических сил, влияющих на пулю) была бы полезна для достижения подходящей точности.

Более сложные модели необходимы для определения источников объектов с криволинейной траекторией, например, гаубичных снарядов. [Zho07] исследует восходящую часть траектории, что позволяет игнорировать фактор сопротивления, поскольку сопротивление направлено вниз, как и сила тяжести. Фильтр Калмана используется для оценки параметров модели траектории. Для оценки источника траектория экстраполируется на основе этих параметров, используется алгоритм Рунге–Кутты. Моделирование показало, что ошибки оценки парамет-

ния, а при моделировании зачастую используются упрощенные и подогнанные под рассматриваемый подход модели процесса. В действительности нет никакой уверенности в точности этих моделей. К тому же аэродинамика снаряда, выброшенного из дула огнестрельного оружия, отличается от аэродинамики объектов, брошенных механически.

### 3. ВИЗУАЛЬНОЕ ОТСЛЕЖИВАНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

В разделе 2 термин «отслеживание объектов», или «трекинг», соответствующий англоязычному tracking, использовался для описания работы датчиков, отслеживающих движение объекта во времени. Однако там основное внимание уделялось математическим аспектам обработки измерений, содержащих ошибки, и уменьшению влияния математически моделируемых ошибок наблюдения. Здесь рассматриваются технические и алгоритмические проблемы трекинга объектов.

Трекинг в целом состоит из наблюдения и позиционирования движущегося объекта с помощью набора датчиков. Отслеживание включает наблюдение за определенной областью в пространстве при помощи одного или нескольких датчиков. Обычно говорят о видеотрекинге, когда для наблюдения за территорией используются видеокамеры. Однако датчики, используемые для отслеживания, могут быть различными: инфракрасные, радиолокационные и т.д. Видеокамеры могут быть дополнены другими датчиками, например, световыми барьерами [Bar09]. Также существует ряд устройств, в которых встроены как видеосенсоры, так и дополнительные датчики.

Система видеоконтроля разрабатывается таким образом, чтобы обеспечить наилучшее размещение датчиков. Некоторые системы позволяют воссоздать механическую структуру трехмерной среды. Изображение, дополненное информацией о трехмерной структуре сцены, называется изображением с картой дальности. Существуют различные подходы к построению оборудования, позволяющего получать такие изображения. Ниже рассмотрены три наиболее распространенных инструмента для получения трехмерных изображений:

1. Стереопара: оборудование включает две цифровые камеры с синхронизированной частотой кадров. Если известно, как определенная точка в пространстве проецируется на оба изображения (то есть каковы пиксельные координаты этой точки  $\{u_l, v_l\}$  и  $\{u_r, v_r\}$  на этих изображениях), можно определить положение этой точки в пространстве (рис. 3). Каждый пиксель на изображении соответствует определенному лучу в пространстве, исходящему из оптического центра камеры. Точка в пространстве, где соответствующие лучи от двух камер пересекаются, является искомой.

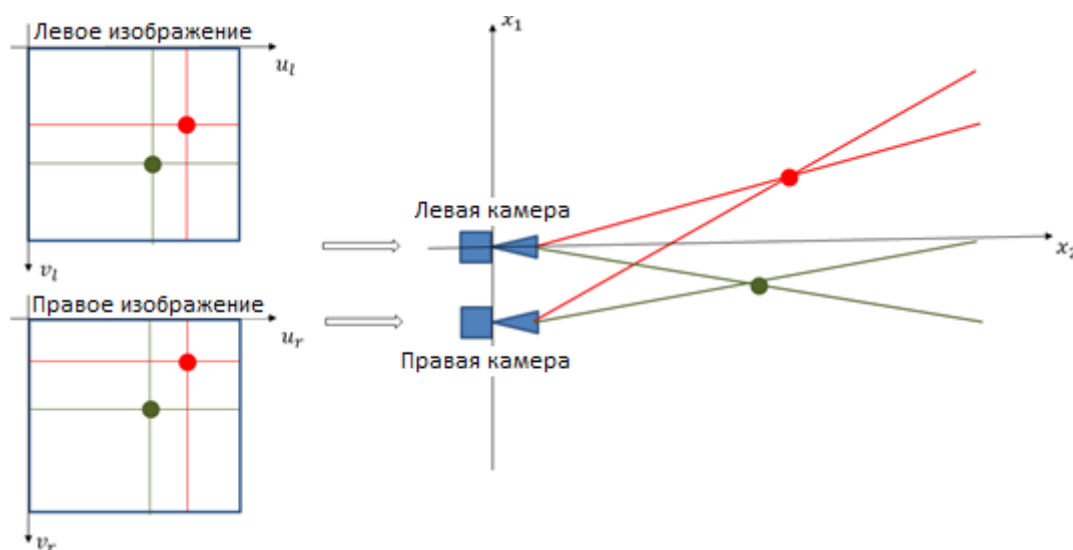


Рис. 3 Определение позиции точки на сцене на основе ее пиксельных координат на двух изображениях.

2. Сканер структурированного света [Vor08, с. 222]: геометрический принцип аналогичен применяемому в стереопаре. Камера дополняется источником света (проектором), который проецирует световые паттерны на сцену. Поскольку свет от проектора образует паттерн, он называется структурированным. Определенная точка паттерна соответствует лучу в пространстве, исходящему из проектора. Если известно положение пикселя определенной точки на изображении с камеры и какую точку паттерна он отражает, трехмерное положение точки можно вычислить (рис. 4) как пересечение луча от камеры (соответствует положению пикселя) и луча от проектора (соответствует определенной точке в шаблоне).

3. Времяпролетная камера (time-of-flight, ToF): одна цифровая камера, дополненная времяпролетным сенсором. Основной принцип ToF-измерений подобен радиолокации. Лазер испускает лучи, а затем определяет расстояние от объекта по времени получения отраженных лучей.

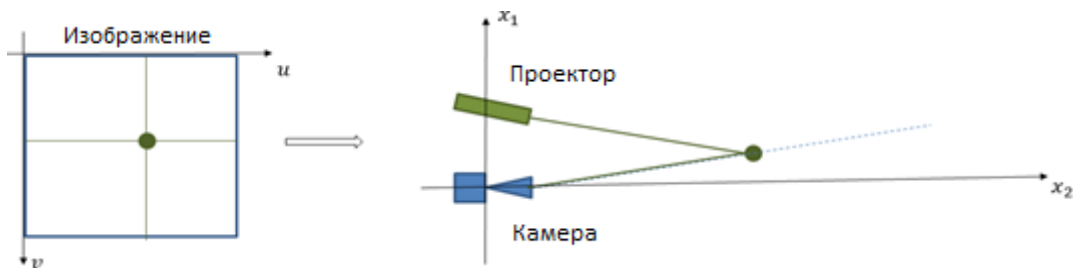


Рис. 4 Определение 3D позиции точки на основе структурированного света.

Во всех трех методах цифровые видеокамеры являются важной частью измерительного оборудования. Камеры обычно нуждаются в калибровке, которая представляет собой процедуру оценки различных параметров камеры, необходимых для 3D-реконструкции. Существуют различные методы калибровки. Один из самых популярных основан на использовании шахматной доски с клетками точно заданного размера [Zha00]. Размер клеток должен быть известен до калибровки. Шахматная доска фотографируется в различных положениях в поле зрения камеры. Последующая обработка изображения с одной камеры позволяет определить так называемые параметры внутренней калибровки камеры. Они представляют собой ее оптические параметры: фокусное расстояние, принципиальную точку и коэффициенты дисторсии. В системе стереовидения при калибровке синхронно делаются снимки шахматной доски обеими камерами. После калибровки каждой камеры по отдельности производится стереокалибровка, которая на основе параметров внутренней калибровки обеих камер позволяет определить параметры внешней калибровки – положение и направление одной камеры относительно другой. Зная параметры внешней и внутренней калибровки, можно выполнить операцию стереотриангуляции.

### 3.1. Захват движения с помощью прикрепленных к объекту датчиков

Перед рассмотрением видеосъемки с измерением дальности, необходимо отметить, что существуют и другие средства определения положения объекта. Например, на летающий объект могут быть установлены датчики, которые передают сигналы о местоположении объекта. Эта техника расположения применялась в [Kim14], где для захвата движения использовались маркеры Optitrack<sup>3</sup>. В этой работе речь шла о трекинге твердых тел сложной формы: бутылки, теннисные ракетки, молотки и т. д. Поскольку координат трех точек достаточно для определения положения и ориентации объекта в 3D-пространстве, перед экспериментами на каждом объекте было установлено по три маячка. Точность позиционирования в работе [Kim14] не оценивалась, однако была достаточной для выполнения робототехнического захвата изображения. В [Bir11] отслеживание на основе маячков использовалось для валидации стереотрекера.

<sup>3</sup> Motion Capture Suits & Markers – OptiTrack, <http://www.naturalpoint.com/optitrack/products/suits-markers>.

Основное преимущество отслеживания на основе маркеров состоит в высокой частоте кадров (например, 240 кадров в секунду в [Kim14]). Если рассматривать этот метод с точки зрения транспортировки объектов в промышленности, то существенный недостаток заключается в том, что метод требует дополнительного оборудования, а также энергии и времени при размещении датчиков на каждом объекте, а затем их снятии. Это может значительно усложнить производственный процесс. Следовательно, наблюдение за объектом с использованием системы внешнего зрения предпочтительнее при такой транспортировке.

### 3.2. Использование структурированного света и времяпролетных сенсоров

Сканеры дальности на основе структурированного света могут основываться на проецировании на сцену цветных точек [Dav96], черно-белых или цветных полос [Boy87], белой сетки [Pro96] или динамических световых шаблонов [Bit76, Cas98, Hor99]. Проецируемые шаблоны могут быть регулярными или псевдослучайными. Как правило, невозможно узнать, какая точка шаблона соответствует известной точке проекции, если шаблон является регулярным. Однако форма проекции позволяет определить форму сцены. Использование регулярных шаблонов (полос) позволяет с большой точностью определять форму объекта, однако не предназначено для определения его абсолютных координат в пространстве. Например, проектор в [Hal01] позволяет фиксировать разницу в дальности с точностью 0.1 мм на расстоянии до 10 см. Это не означает, что объект должен находиться не более чем в 10 см от передней панели проектора. Разность расстояний точек объекта друг от друга должна превышать это значение (поскольку система структурированного света измеряет соответствующие пропорции между различными частями объекта). Такие системы бесполезны для позиционирования объектов в воздухе (за исключением оценки их пространственной ориентации), поскольку летящий объект находится далеко от любых других объектов сцены. В [Wan08] рассматривается механизм определения абсолютной дальности. Для этой цели световые шаблоны проецируются на сцену с помощью отражения от вращающегося зеркала. Вращение зеркала обеспечивает динамический характер световых паттернов, поэтому этот метод вполне применим, но только для статических сцен.

Структурированный свет с псевдослучайными паттернами позволяет измерять абсолютную дальность; однако точность этого измерения обычно ниже, чем для методов, основанных на регулярных паттернах. На сегодняшний день наиболее распространенной камерой структурированного света является Microsoft Kinect<sup>4</sup>. Широкое использование этого устройства существенно повысило интерес к датчикам структурированного света, особенно при трекинге объектов. Однако точность позиционирования Kinect не очень высока. Ошибки в позиционировании объекта увеличиваются примерно с 2 мм на расстоянии 1 метра до 7 см на расстоянии 5 метров. На расстоянии 3 метров она составляла около 2.5 см. Все три значения взяты из [Kho12, с. 1451]. Разрешение карты глубины Kinect составляет 640×480; однако как оно достигается, не является общедоступной информацией, и реальное разрешение датчиков Kinect неизвестно [Noo11]. Низкая точность позиционирования датчика Kinect может означать, что разрешение достигается интерполяцией данных с меньшим числом пикселей.

Первым исследованием, в котором структурированный свет использовался для наблюдения за движущимися объектами, было [Hal01]. В нем применялось специальное кодирование границ, которое позволяло распознавать соответствие между кадрами. Система смогла создать 3D-модель миниатюрного слона с рабочим объемом 6×12×16 см. Однако позиционирование изолированных объектов в 3D-пространстве не рассматривалось в [Hal01]. Из-за аппаратных ограничений система могла реконструировать только медленно движущиеся объекты (в примере – 1 см/с). В [Ada04, Ada05] для управления робототехническим манипулятором была применена техника структурированного света. Работа [Ada04] посвящена в основном

<sup>4</sup> Kinect for Windows – Microsoft, <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/apps/design/devices/kinect-for-windows>.



используемым паттернам структурированного света, в то время как в [Ada05] описана процедура трекинга и поиска соответствий между кадрами. Набор точек проецируется на сцену, и каждая точка может иметь один из семи цветов. Цветовые коды точек закодированы для псевдослучайной последовательности, чтобы избежать повторения в узорах точек. В [Suk12, Kim13] исследуется оценка дальности до движущихся объектов с использованием метода структурированного света. CAD модели объектов также используются в качестве предварительного ввода; известный размер детали с проекциями рисунка позволяет определить расстояние до объектов в 3D-пространстве. Ошибка позиционирования объекта достигала нескольких миллиметров (максимум 4.72).

За исключением этих работ существует мало литературы об использовании общей техники структурированного света для позиционирования объекта в 3D-среде. В целом использование структурированного света для отслеживания быстро движущихся объектов недостаточно изучено. На современном этапе развития технологии визуальной оценки дальности стереовидение предпочтительнее для приложений, связанных с ТвТ.

Точные времяпролетные системы обычно намного дороже, чем Kinect или стереокамеры, из-за высокой стоимости лазерных дальномеров высокого разрешения. Точность позиционирования ToF ограничена низким разрешением доступных датчиков глубины. В [Pia10] датчик с разрешением по глубине  $320 \times 200$  пикселей указан как датчик с самым высоким разрешением во всем мире. До сих пор неизвестно о времяпролетных камерах с более высоким разрешением. Версия Kinect конца 2013 г. основана на принципе ToF. Разрешение изображений глубины с этого устройства составляет  $512 \times 424$  пикселей; однако оно могло быть достигнуто путем интерполяции. Невремяпролетные камеры с гораздо более высоким разрешением легко доступны. Например, IDS UI-3370CP имеет разрешение  $2048 \times 2048$  пикселей<sup>5</sup>.

Дополнительная калибровка времяпролетной камеры может повысить ее точность или, по крайней мере, позволить оценить ее. В [Fuc08] описан метод дополнительной калибровки времяпролетных датчиков для точного позиционирования камеры в пространстве. Номинальная точность управления положением робота составляла 1 мм для перемещения и 0.1 градуса для поворота. Во время калибровки была достигнута точность 1 мм со стандартным отклонением 5 мм. В [Noo11] также применяется процедура калибровки трекера на основе Kinect. Ошибки позиционирования составляли от 1 до 6 мм в зависимости от кадра. Анализ точности позиционирования и калибровки ToF приведен в диссертации Пиатти [Pia10]. Результаты были применены к двум камерам ToF: SR4000 (диапазон 10 м, разрешение  $176 \times 144$  пикселей для изображения глубины [Pia10]) и PMDCamCube3.0 (диапазон 7.5 м, изображение глубины  $200 \times 200$  пикселей<sup>6</sup>). Расхождение позиционирования составляло до 15 мм. После калибровки оно уменьшилось до 3 мм в диапазоне дальностей 1.5–4 м.

Исследования по отслеживанию объектов с использованием времяпролетных сенсоров сенсоров структурированного света широко распространены в таких областях, где точное позиционирование не является обязательным, как отслеживание людей в рамках взаимодействия людей и роботов [Swa08, Gan10, Jia14], локализация мобильных роботов [Ita12] или отслеживание мини-беспилотников [Jur12]. В [Swa08] камера SR300 ToF использовалась для обнаружения и отслеживания людей. Были достигнуты погрешности позиционирования в несколько сантиметров, удовлетворяющие требованиям исследовательского проекта. [Gan10] изучал ту же проблему. Позже в [Jia14] отслеживание нескольких людей было выполнено с использованием нескольких датчиков ToF, установленных на потолке. Обе работы направлены на оценку позы человека, а не моделирование движения или точное позиционирование. В [Par11] система, основанная на датчиках Kinect, была обучена оценивать местоположение объектов без текстуры (армилярная сфера, миниатюрное здание, игрушечное судно и т. д.). Приведены ошибки проецирования; однако единицы, в которых они указаны, неясны

<sup>5</sup> UI-3370CP – USB 3 Cameras – CAMERAFINDER – Products, <http://en.idsimaging.com/store/ui-3370cp.html>.

<sup>6</sup> PMD [Vision] CamCube 3.0 – PMDtechnologies Gsmhb, [http://www.pmdtec.com/news\\_media/video/camcube.php](http://www.pmdtec.com/news_media/video/camcube.php).



(миллиметры, сантиметры, радианы, доли относительно размера объекта и т. д.). Также проводятся временные затраты. Процесс начальной оценки занял менее 30 мс, а процесс оценки на основе предыдущих кадров занял менее 15 мс (номинальная частота кадров Kinect составляет 25 кадров в секунду, что приводит к задержке между кадрами 40 мс).

Позиционирование робота – это еще одно приложение, в котором используется машинное зрение и где были применены датчики ToF [Nak11]. В этой задаче точность позиционирования может быть легко определена путем сравнения данных с логами системы управления роботом. В [Nak11] обнаружение объекта и установление соответствия между пикселями с карты глубины и цветного изображения выполняется для объектов, которые имеют более высокий цветовой контраст, чем у сцены. Для оценки использовался фильтр частиц. К сожалению, значения ошибки не приведены, но графики [Nak11, с. 787–788] и запись<sup>7</sup> позволяют предположить, что они достигли, по крайней мере, нескольких миллиметров.

Трекинг сферических объектов был исследован в [Sir12, Jur12]. В [Jur12] был разработан метод трекинга летящего квадратора, у которого основание винта имеет сферическую форму. [Sir12] особенно интересен, поскольку отслеживание ToF в нем используется для захвата мяча промышленным роботизированным манипулятором с семью степенями свободы (роботизированная рука с семью степенями свободы также используется в проекте TU Wien TbT). Линейный фильтр Калмана был адаптирован для оценки траектории (модель с постоянной скоростью, изменение скорости считается шумом процесса). Робот-манипулятор может хватать либо неподвижный шар, либо шар, лежащий на мобильном роботе, движущемся по прямой. Робот смог выполнить задание максимум за 20 с.

Камеры ToF впервые были применены для обнаружения брошенных объектов в [Opr13]. Было рассмотрено два случая: «бросок», когда энергия и направление объекта приданы ему от человеческой руки, и «падение», когда человек отпускает объект и позволяет ему упасть. Решение было протестировано на 50 записях Kinect (25 бросков и 25 падений). Задача состояла не в том, чтобы обнаружить летящие объекты, а в том, чтобы определить, когда объект был брошен или опущен.

Времяпролетные системы могут основываться как на электромагнитных, так и на звуковых волнах. Работа [Ita12] может быть приведена в качестве примера трекинга на основе времяпролетной акустической системы. При навигации мобильного робота использовались ультразвуковые волны (частота 160 кГц) для определения местоположения источника эха. Порядок точности составил 1 см [Ita12]. Большая длина акустических волн (при 160 кГц она составляет 2 мм) ограничивает точность определения местоположения источника эхо-сигнала [Ita12]. Кроме того, низкая скорость звука ограничивает частоту кадров и точность определения местоположения быстро движущихся объектов.

Отслеживание ToF может стать перспективной технологией в будущем, но в настоящее время она не обладает высоким разрешением, необходимым для систем, основанных на стереовидении.

### 3.3. Монокулярное зрение

Стереопара – это специальная видеосистема, которая гарантирует, что пиксельные координаты на изображении однозначно определяют положение объекта в трехмерном пространстве. Однако это не означает, что невозможно определить местоположение объекта с помощью одной камеры. Использование дополнительной информации в конкретных случаях может позволить определять положение объекта на основе изображений с одной камеры. Отслеживание объектов для приложения TbT на основе систем с одной камерой изучено в [Var08]. Камера была дополнена другими датчиками, но координаты объекта извлекаются только из изображений. Эта настройка не позволяет построить полную модель 3D-сцены. Однако информация о трехмерной структуре сцены на самом деле не является необходимой

<sup>7</sup> 3D object tracking by the particle filter and the Kinect – YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=2m47m-UN-wWc&feature=feedu>.

для отслеживания летящего объекта, особенно когда у трекера есть предварительная информация об объекте и окружающей среде.

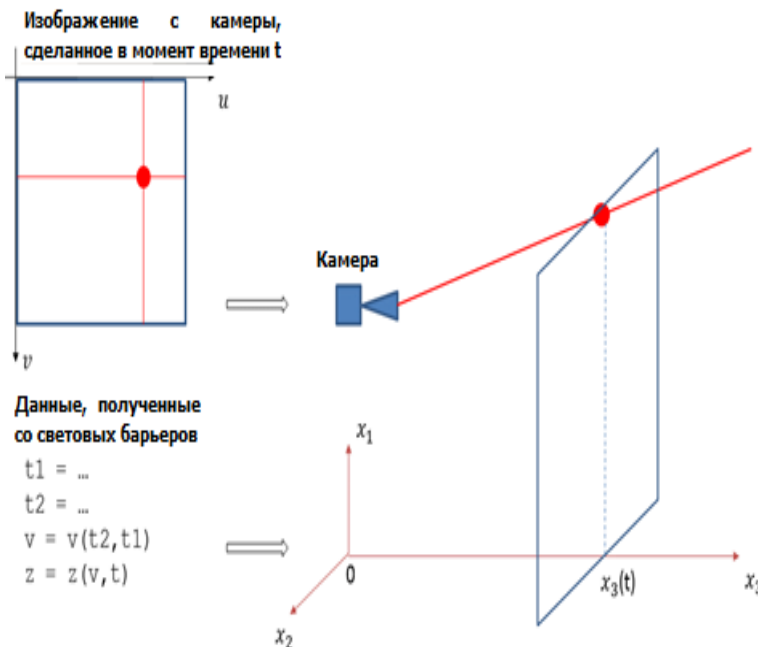
В [Bar08, Bar11] использовалась одна камера, дополненная световыми барьерами. Барьеры измеряли начальную скорость мяча. Два световых барьера были расположены на расстоянии  $d = 100$  мм между ними. Первый барьер оставался на расстоянии 100–200 мм от точки, в которой объект переставал ускоряться. Скорость запуска рассчитывалась с использованием уравнения:

$$v_{0z} = \frac{d}{t_2 - t_1} = 0,1(t_2 - t_1)^{-1}, \quad (18)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – время пересечения первого и второго светового барьера соответственно. Эти временные метки измеряются с точностью до 0.5 мс, что является временем для реакции барьера. Положение объекта на изображении позволяет определить, что в мировой системе координат он расположен на некотором луче, исходящем из датчика камеры (так же, как на рис. 3). Фактическая координата объекта по оси  $z$  (то есть по оси, перпендикулярной плоскостям световых барьеров) определяется как численное решение следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{C_d \rho A \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}{2m}, \quad (19)$$

где  $C_d$  – коэффициент сопротивления;  $\rho$  – плотность воздуха;  $A$  – характерная площадь шара;  $m$  – масса шара. Метод Рунге – Кутты позволяет рассчитать приблизительное значение  $z(t)$  из этой формулы. Предполагаемое положение шара на момент времени  $t_1$  определяется как точка пересечения луча  $b$ , извлеченного из изображения, и плоскости  $z_1 = z(t_1)$  (рис. 5). Таким образом, предположение о форме траектории позволяет реконструировать ее на основе последовательности монокулярных изображений.



**Рис. 5** Определение положения мяча с помощью метода из [Bar08]. Световые барьеры измеряют время, когда мяч их пересекает. Разница между временем позволяет определить горизонтальную скорость объектов. Эта скорость прогнозируется для определения расстояния, достигнутого объектом в любой момент времени, трехмерное положение объекта определяется как точка на луче, соответствующем пиксельным координатам объекта, на данном расстоянии.

Этот метод прогнозирования баллистической траектории был полезен в условиях эксперимента и позволял достичь погрешности прогнозирования менее 12.5 мм для 66% бросков. Позже в [Rib09] оценка трехмерной баллистической траектории была исследована как задача локальной оптимизации. В этой работе учитывалось только влияние гравитации. Отсутствие триангуляции траектории связано с тем, что оценка положения мяча основана на информации об аэродинамике мяча. Как обсуждалось в разделе 1, аэродинамическая модель, основанная

на учете гравитации и лобового сопротивления и выражена уравнением (10), не очень точна даже для сферических объектов простой формы, таких как теннисный мяч, и лучше избегать ее использования для достижения более высокой точности. Модель движения, описанная уравнением (19), является упрощением модели, описанной уравнением (10): предполагается, что вектор силы сопротивления можно разложить по трем пространственным измерениям и рассматривать его компоненты независимо друг от друга, что неверно. С другой стороны, финансовое преимущество использования одной камеры вместо двух не является существенным; цена нескольких цифровых камер намного меньше, чем у роботов-манипуляторов 6DoF, используемых для захвата. Если работа направлена на разработку модели прогнозирования, не требующей точных знаний о физических свойствах траектории, использование этих знаний для триангуляции траектории было бы крайне нежелательно. Однако метод измерения скорости, описанный в [Var08, с. 894], может быть полезен для извлечения информации о начальных условиях броска.

### 3.4. Стереовидение

Системы видеонаблюдения могут состоять из одной, двух или большего числа камер. Система наблюдения с одной камерой должна быть дополнена другими устройствами (световые барьеры, датчики ToF и т.д.), чтобы можно было оценивать дальность до объектов на изображении. Двух камер достаточно для извлечения информации о координатах с помощью стереотриангуляции без использования дополнительных датчиков. Большинство современных приложений TbT и роботизированного захвата брошенных объектов используют стереотриангуляцию для трекинга объектов [Nov91, All91, Ril02, Nam03, Sca05, Bae10, Pon11].

Алгоритм стереотриангуляции не нуждается в аэродинамических моделях для восстановления положения объекта. Ему нужна информация об относительном расположении камер (параметры внешней калибровки) и об оптических параметрах каждой камеры (параметры внутренней калибровки): фокусное расстояние, принципиальная точка, коэффициенты дисторсии и т.д. Эту информацию можно получить во время калибровки стереосистемы. Калибровка стереосистемы выполняется на основе калибровки отдельных камер, как упоминалось ранее. Если взаимное расположение камер не меняется, после калибровки становится возможной стереотриангуляция<sup>8</sup>.

Точность позиционирования объекта с помощью стереотриангуляции зависит от разрешения и других параметров камер. Определение точности для конкретной установки недостаточно четко рассмотрено в современных работах по стереовидению. Можно упомянуть несколько редких примеров таких работ, например, [Lee02, Liu06]. [Lee02] рассматривает вопрос о том, как разместить камеры таким образом, чтобы наблюдаемая поверхность была максимизирована, а ошибки реконструкции сведены к минимуму. Рассматривается система с несколькими стереопарами для наблюдения за сценой, но также оценивается точность одной стереопары. Авторы указывают [Lee02, с. 222–223] следующие причины неточности позиционирования в системах стереотриангуляции:

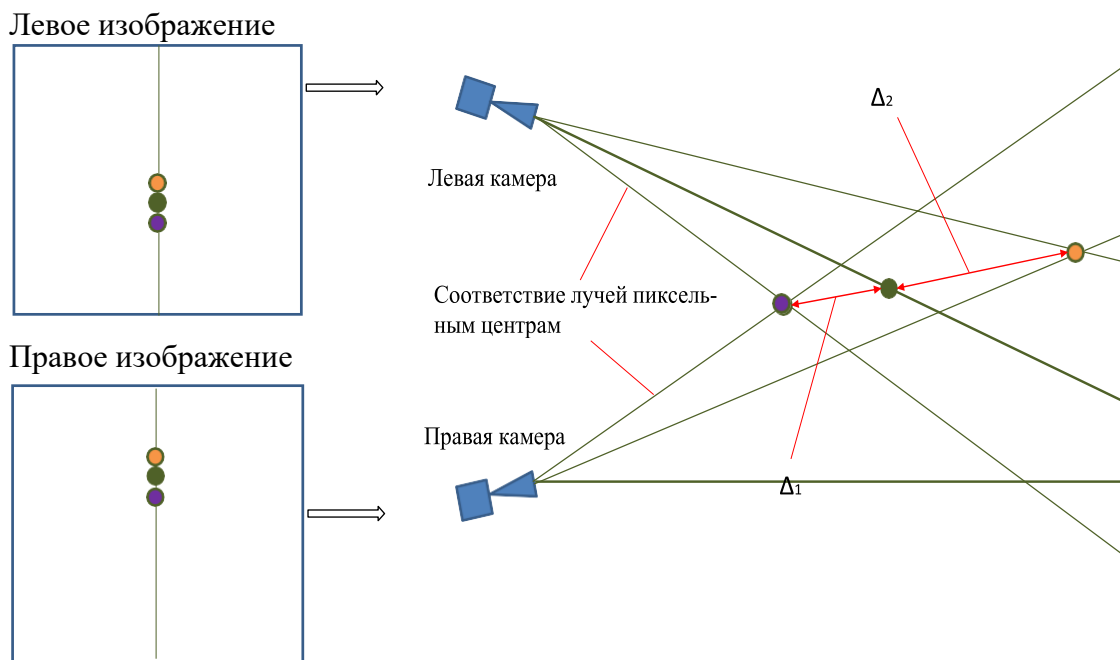
– Ошибки квантования: один пиксель на изображении соответствует некоторой области сцены. С увеличением расстояния от камеры до фона размер этой области также увеличивается. Невозможно точно определить расположение точки внутри области, соответствующей одному пикселю. Визуализация ошибок квантования приведена на рис. 6. Можно определить интервалы  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , на которых лежат границы между соседними пикселями; ошибка квантования для данного пикселя будет соответствовать ошибке в интервале  $\Delta_1 + \Delta_2$  в трехмерном пространстве.

– Ошибки обработки изображений: они связаны с неправильным определением пиксельных координат точки на изображении. В [Lee02] эти ошибки в первую очередь рассматрива-

<sup>8</sup> Camera Calibration Toolbox for MATLAB, <https://www.allanlab.org/>.

ются как ошибки *stereo matching*. *Stereo matching* – это процесс определения пар точек, которые соответствуют друг другу на левом и правом изображениях. Это одна из основных задач при обработке стереоизображений, и она часто приводит к ошибкам, особенно при загорании одних объектов другими, при работе с объектами без текстуры и при асимметричном освещении. При трекинге объектов сопоставление пиксельных координат объекта выполняется не так, как при решении задачи реконструкции сцены. Положение центра объекта на каждом изображении определяется по отдельности; это определение может производиться с некоторой ошибкой.

– Ошибки калибровки: они возникают из-за ошибок квантования в процессе калибровки. Это приводит к неточности в определении параметров внешней и внутренней калибровки системы камер.



**Рис. 6** Точность квантования в стереовидении

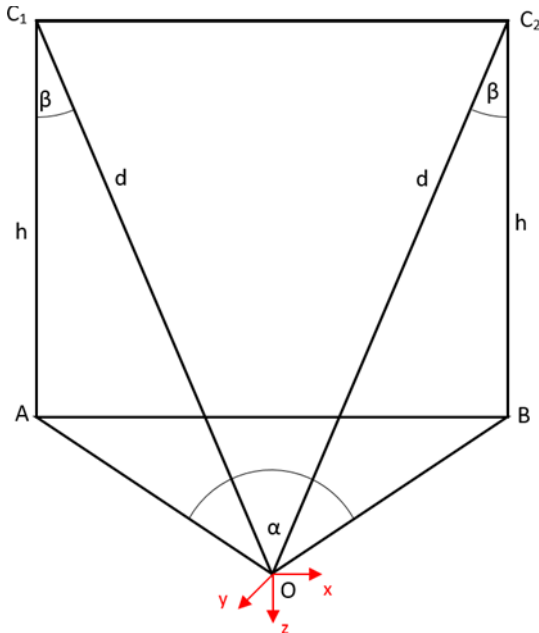
( $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  показывают диапазон, в котором может располагаться граница между пикселями).

Было показано, что ошибки квантования сильно зависят от расстояния до камеры, в то время как ошибки обработки изображений и калибровки – очень незначительны. Взаимное расположение камер было изучено и оптимизировано в симуляции. Задача оптимизации состояла в том, чтобы найти оптимальное соотношение поля зрения стереопары и ошибок квантования. В ходе моделирования было достигнуто снижение ошибок квантования на 20%.

Позже в [Liu06] был рассмотрен вопрос о взаимном расположении камер в стереопаре. В этой работе рассматривается следующий частный случай. Расстояние между камерой и наблюдаемым объектом фиксировано, а угол  $\alpha$  между оптическими осями камер и высота камер над объектом  $h$  изменяются (геометрический смысл этих параметров показан на рис. 7). Была исследована зависимость точности позиционирования от значений  $h$  и  $\alpha$ . Такая постановка задачи может быть спорной, поскольку не совсем ясно, какой параметр  $h$  на самом деле представляет. Изменение  $h$  без изменения расстояния до объекта означает, что стереопара будет вращаться вокруг объекта в вертикальной плоскости. С физической точки зрения это означает, что между стереосистемой и вектором гравитации разные углы, но оптический смысл такого вращения неясен.

Увеличение количества камер не изменяет принцип триангуляции, однако может:

- повысить точность позиционирования, так как положение объекта может быть лучше оценено по результатам различных стереопар. Примером такого метода является использование системы тринокулярного зрения;
- увеличить размер наблюдаемой сцены, так как различные подзоны сцены могут наблюдаться различными стереопарами.



**Рис. 7** Геометрическая модель стереосистемы, исследуемая в [Liu06]. Наблюдаемый объект расположен в точке  $O$ ;  $C_1O$  и  $C_2O$  – оптические оси правой и левой камеры соответственно;  $AO$  и  $BO$  – их проекции на горизонтальную плоскость;  $\alpha$  – угол между  $AO$  и  $BO$ .

Тринокулярные стереосистемы подразумевают возможность сравнения изображений с трех камер. Они используют специальные методы триангуляции, которые позволяют повысить точность. В бинокулярной системе трехмерное положение представляет собой пересечение двух лучей в пространстве (в идеальном случае) или центр кратчайшего отрезка между точками на этих лучах (в реальности). Тринокулярное зрение означает, что 3D-положение точки определяется как место пересечения трех лучей. Это означает, что третья

камера дает дополнительную информацию, которая позволяет уточнить результаты бинокулярной стереорекострукции. Например, окончательная оценка положения точки в трехмерном пространстве может быть определена как центроид результатов реконструкции трех возможных пар камер в тринокулярной системе. Точность этих систем была изучена в [Chi95]. Работа сосредоточена на проблеме *stereo matching*; также обсуждаются некоторые особенности тринокулярной системы, например ограничения по положению проекции. В работе [Chi95] не проводилось сравнения с бинокулярными системами.

Если для наблюдения сцены используются несколько стереопар, то вопрос об оптимальном расположении датчиков становится актуальным. Он изучается, например, для определения размещения камер охранного видеонаблюдения [Mor10], управления дорожным движением [Cho11], а также для промышленных сред. Задача состоит в том, чтобы максимально эффективно охватить запрашиваемую область минимальным количеством камер. Кроме того, расположение источников света может быть добавлено к списку рассматриваемых факторов [Gar11].

В ТбТ область возможной траектории объекта может быть разделена на подзоны, которые будут наблюдаться различными стереопарами. Одна пара наблюдает за начальной частью траектории, чтобы предоставить входные данные для прогнозирования, в то время как другая пара наблюдает за рабочим пространством устройства захвата для возможных корректировок и для определения того, был ли захват успешным или нет. Общие задачи трекинга в таких средах подразумевают «переход» объекта от одной стереопары к другой. [Liu09, Liu10] рассмотрели ситуацию, когда объект обнаруживается одной камерой, а вторая камера должна быть выбрана из нескольких для совместной работы, чтобы создать стереопару.

Работа [Lee02] упоминалась выше, когда речь шла о точности стереопар. В целом в этой работе изучаются аспекты многокамерной системы, построенной как набор стереопар. Размещение камер в такой системе было изучено и оптимизировано в симуляции. Задача оптимизации состояла в том, чтобы найти оптимальное соотношение поля зрения стереопары и ошибок квантования. Эта задача была решена для заданной сцены.

На коротких расстояниях (до 1.5 м) одной стереопары достаточно для отслеживания летящего тела. Исследование точности такого позиционирования не показало существенной взаимосвязи точности с местоположением объекта в области его возможной траектории [Pon15]. Результаты точности были признаны достаточными для применения. Теоретически было бы интересно применить триокулярную систему или другие варианты размещения камер, которые позволили бы более точно оценить 3D-положение, чем бинокулярная стереосистема. Причина, по которой они не были рассмотрены в текущем исследовании, связана с большими временными затратами при увеличении количества камер. Нахождение центра шара на изображении – это этап работы алгоритма трекинга и прогнозирования, который требует наибольшего времени, даже при выполнении на специализированной быстрой аппаратной платформе (реализация на GPU или FPGA). С другой стороны, при увеличении дальности броска использование систем с несколькими камерами кажется многообещающим.

Стереосенсоры могут быть не только установлены статически или закреплены непосредственно на объекте, но и перемещаться по наблюдаемой сцене. Этот метод часто используется для статических сцен, когда возникает необходимость полностью восстановить форму 3D-объекта. Использование движущихся камер для отслеживания движущегося объекта было введено в [Fed90] для задач перемещения с одной степенью свободы. Трекер с двумя DoF был разработан Мукаи и Исикавой [Muk94]. Датчики расположены на роботизированной руке, которая выполняет движение вблизи объекта. Сложность применения такого подхода для трекинга летящего тела обусловлена высокой скоростью полета; необходимы невероятно быстрые манипуляторы. Еще одним недостатком является то, что погрешность реконструкции увеличивается из-за неточности самопозиционирования камеры. Из-за этого предпочтительнее использовать статическую настройку камеры.

#### 4. РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ И ТРАНСПОРТИРОВКА ПЕРЕБРОСОМ

Способность бросать и ловить твердые предметы присуща почти всем людям. Та же задача применительно к робототехническим манипуляторам была впервые введена как способ сделать роботов более похожими на людей по своим способностям. Хотя люди не используют физические или математические модели для прогнозирования траектории полета мяча, в большинстве работ в области роботизированного захвата используются аналитические методы, основанные на этих моделях. Цель этого раздела – дать обзор существующих разработок робототехнических систем, способных бросать и ловить объекты, а также решать сопутствующие задачи (то есть отслеживать объекты в воздухе и прогнозировать их траектории). Этот обзор включает исследования, проведенные в рамках проекта «Транспортировка перебросом», в дополнение к остальным работам. Вопросы прогнозирования кратко обсуждаются в этом разделе как аспекты улавливания движений и принципов схватывания. Более точный обзор того, как решается задача прогнозирования в этих работах, приведен в разделе 5.

##### 4.1. Бросок и захват

Цель роботизированного броска состоит в том, чтобы обеспечить параметры запуска, позволяющие объекту достичь определенной области (рабочее пространство устройства захвата в случае, когда предполагается захват брошенного объекта). Также при решении этой задачи может затрагиваться вопрос о минимизации повреждений [Miy10]. Существует ряд работ, в которых рассматривается и анализируется бросание само по себе [Kob11, Nem11, Zha12, Kan12]. Есть несколько примеров, когда рассматривается потенциальное применение бросания в промышленности для сбора объектов в контейнеры [Miy10], но в большинстве работ бросание рассматривается в общем контексте развития робототехники. В различных подходах были разработаны методы бросания для манипуляторов с одной степенью свободы [Miy10, Kob11], манипуляторов с шестью степенями свободы [Nem11, Zha12] и робототехнической руки гуманоидного робота [Kan12]. Когда рассматривается задача бросания объекта в непо-

движную цель (например, в рабочее пространство робота-ловца), устройство с одной степенью свободы вполне может обеспечить требуемый диапазон возможных траекторий. Регулируемым параметром такого «одномерного» броска является пусковой импульс, в то время как направление броска определяется расположением метательного устройства. Бросающие роботы с большим количеством DoF интересны тем, что в этом случае манипулятор может выполнять некоторые дополнительные действия с объектом перед броском, например, он может забирать объекты из хранилища. Катапульта с одной степенью свободы может бросать и ничего больше; объект должен быть помещен в чашу другим манипулятором или человеком.

Схватывание и перемещение неподвижных объектов было одной из первых способностей, которую обрели роботы. Некоторое время спустя была исследована задача согласования движения манипулятора с движением динамического объекта. В этих ранних работах рассматривались двумерные траектории объектов (например, траектория качения шара по плоской поверхности в [And85]), а затем и трехмерные. Основное различие между захватом объекта в 2D и захватом летящего объекта заключается в низкой скорости объекта для первого случая. Робот, используемый в [All93], захватывал миниатюрные поезда, движущиеся по круглому железнодорожному пути со скоростью 10–30 см/с. Робот в [Lin89] смог поймать объект, движущийся по синусоиде, но для выполнения захвата потребовалось около 2.25 секунды. Робот в [And85] смог поймать большую часть шаров, двигавшихся со скоростью 0.75 м/с и некоторые шары, двигавшиеся со скоростью 1.3 м/с.

Полет брошенного объекта является высокоскоростным 3D-процессом по сравнению с относительно медленным 2D-движением, рассмотренным выше. Устройство захвата должно быть достаточно быстрым, чтобы выполнить соответствующее движение для захвата (особенно при мягком захвате). Это включает как требования к механической скорости (способность сочленений обеспечивать быстрые движения), так и требования к скорости работы алгоритмов (трекинг в реальном времени с высокой частотой кадров, быстрое прогнозирование и быстрое планирование траектории захвата). Захват может быть пассивным (с минимальной силой удара захватом) или активным (интенсивное движение устройства захвата к объекту).

Роботизированный захват объектов в полете был впервые рассмотрен более двадцати лет назад в [Nov91]. Была разработана концепция координации «видение – движение» (то есть регулирование движения робота на основе данных системы стереовидения); для прогнозирования движения применялась параболическая модель траектории. Эта концепция была продемонстрирована с использованием манипулятора с четырьмя степенями свободы, рабочим пространством 4.2 м<sup>3</sup> и максимальной скоростью рабочего органа 2 м/с. В экспериментах доля успешных захватов составлял 75–80%. Данные о способе бросания не предоставляются.

Роботизированный захват также рассматривался в [Nis97]. В этой работе задача была впервые поставлена для гуманоидного робота с целью «реализации человеческих навыков на гуманоиде». Визуальная обратная связь не использовалась, и движение робота определялось только на основе прогноза траектории мяча. Другими словами, движение захвата не корректируется в соответствии с новыми наблюдениями после начала хватательного движения. Прогноз основывается на информации о начальной части траектории, но после наблюдения за этой начальной частью мяч больше не отслеживается. К гуманоидной руке была прикреплена корзина диаметром 120 мм для приема мяча. Во время движения захвата активна только рука, а сам робот остается неподвижен. Две ПЗС-камеры, установленные на голове гуманоида, интегрированы в стереопару. Были исследованы шары, которые были сброшены вертикально. Предсказание не требовалось для того, чтобы поймать корзиной вертикально брошенный объект, поскольку траектория мяча определяется только в одном измерении, а скорость перехвата не критична для жесткого захвата. Для мяча, брошенного под углом к горизонту, прогноз делается путем аппроксимации траектории параболой. Доля успешных захватов не упоминается, но для ее увеличения было предложено включить визуальную обратную связь в схему управления.



В рамках другого исследовательского проекта Токийского университета были опубликованы ряд статей, в которых исследуется процесс робототехнического захвата [Ish96, Nam99, Nam03a, Nam03b, Ima04, Sen04, Shi05, Fur06]. В рамках этого проекта рассматривался захват с использованием хватательного движения (то есть процесс смыкания пальцев манипулятора вокруг объекта). Философию данного подхода можно назвать противоположной философии [Nis97], где движение определялось только на основе прогнозирования без учета фактической визуальной обратной связи. В этих же работах схватывание определяется исключительно на основе визуальной обратной связи без учета прогноза.

В [Ish96] была предложена архитектура для быстрого отслеживания целей. Аппаратное обеспечение и алгоритмы в этой архитектуре основаны на прямом подключении фотоэлементов сенсора камеры к процессорным блокам и сильно распараллеленной обработке информации фотодатчиков вместо традиционного захвата всего изображения с камеры. Это позволяет обеспечить обратную связь системы за 1 мс (с задержкой 20 мс между наблюдением и реакцией актуатора). Алгоритмы обработки видео основаны на том, что следующие друг за другом кадры высокоскоростного видео имеют очень мало различий. Целевой объект (считающийся монохромным) извлекается из изображения путем сравнения текущего кадра с расширенным целевым шаблоном из предыдущего кадра (процедура расширения показана на рис. 8). Также распознаются и обрабатываются случаи визуального пересечения целевого объекта с похожими объектами сцены и их отделения друг от друга.

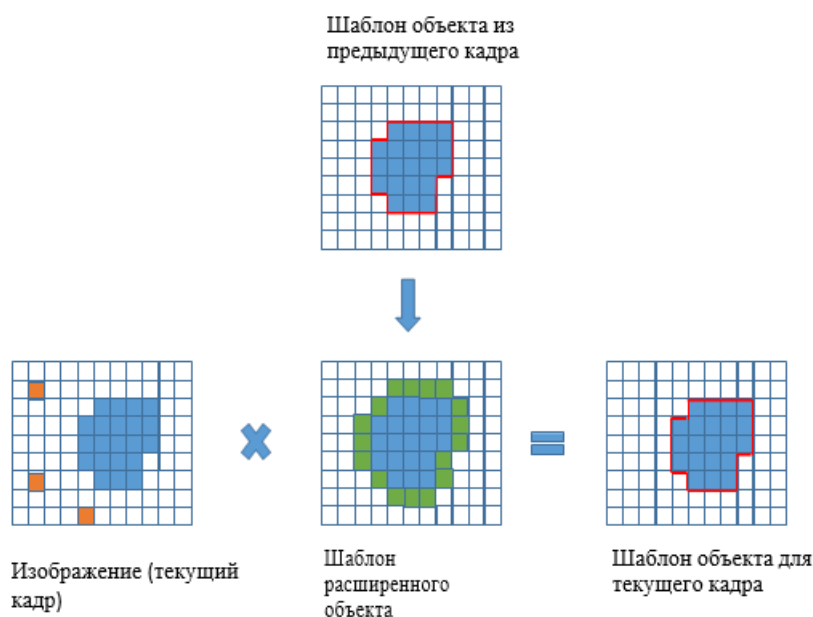


Рис. 8 Отслеживание объектов в [Ish96].

Техника захвата (применяемая к медленно движущимся объектам), основанная на механизме отслеживания из [Ish96], была разработана в [Nam99]. Захват производился манипулятором с семью степенями свободы и многопалым устройством захвата (4 пальца и 14 суставов, один палец является «большим», то есть противоположен остальным). Платформа, на которой закреплены сенсоры, также может перемещаться. У нее две степени свободы – поворот и наклон, которые позволяют перемещаться в соответствии с меняющимся положением объекта. Концепция трекинга из [Ish96] была реализована на специальном чипе SPE-256. Подсистема управления состоит из 7 цифровых сигнальных процессоров, работающих синхронно. Они управляют манипулятором, устройством захвата и основанием камеры. Алгоритм трекинга дополнен 3D-реконструкцией и оценкой положения объекта. Стадия прогнозирования игнорируется в связи с высокой скоростью реакции системы. В каждый момент новая команда для манипулятора определяется таким образом, чтобы расстояние между манипулятором



и объектом было минимальным. Цель управления устройством захвата состоит в том, чтобы по возможности накрывать объект пальцами. В описанных экспериментах захваченный предмет перемещался человеческой рукой.

Захват свободно летящих объектов, основанный на тех же принципах, был впервые рассмотрен в [Nam03a], где параметры движения робота (то есть желаемая траектория рабочего органа) определяются непосредственно из наблюдаемых 3D-координат объекта без учета скорости и промежуточного прогноза траектории. Соотношение между входными и выходными параметрами было определено путем оптимизации коэффициентов полиномов 4-го порядка. Концепция была применена к 4-осевой роботизированной руке (в процессе захвата использовались только 3 оси), которая смогла развить скорость 5 м/с и ускорение 30 м/с<sup>2</sup>. Движение по захвату было объявлено успешным (последовательность кадров успешного захвата приведена в [Nam03a, с. 2405]), но никаких данных о доле успешных захватов не приводится.

В [Nam03b] была разработана новая многопалая рука для ловли. Она обеспечивает усилие захвата до 47 ньютонов и скорость движения пальца до 4.5 м/с, что позволяет руке закрываться в течение 70–120 мс. Эксперименты по активному захвату с использованием этой руки и новой системы высокоскоростного наблюдения более подробно обсуждаются в [Ima04] (в предыдущей работе рассматривался пассивный захват). Активный захват позволяет ловить движущийся объект с большей скоростью, чем максимальная скорость пальцев робота. В этой работе рассмотрено, как поймать падающий предмет (то есть рассматривается случай, когда вектор скорости объекта направлен вниз). Были проведены успешные эксперименты для шаров и цилиндров.

В [Sen04, Shi05, Fur06] концепция была распространена на более сложные задачи манипулирования, чем захват, например отбивание [Sen04] и дриблинг мяча [Shi05], а затем захват цилиндрического объекта [Fur06]. В целом проект активного захвата [Ish96, Nam99, Nam03a, Nam03b, Ima04, Sen04, Shi05, Fur06] включает в себя большое количество новых концепций в робототехнике и машинном зрении, таких как прямое взаимодействие процессора с элементами матрицы сенсоров, непосредственное взаимодействие трекера и роботизированного контроллера, активное схватывание и т.д. Однако, имея в виду TbT, у него есть некоторые недостатки. Для начала рассматривается ситуация, когда любое движение захвата по направлению к объекту хорошо для захвата. Это кажется полезным на небольшом расстоянии с очень быстрым роботом-манипулятором, но на больших расстояниях в несколько метров необходимо учитывать характер кривой траектории объекта. Траектория движения в рабочем пространстве устройства захвата должна быть предопределена заранее, иначе устройству захвата, возможно, не удастся поймать объект, если тот улетит далеко от своего начального положения. Это означает, что концепция может быть полезна на конечной стадии, когда объект находится рядом с устройством захвата.

Принцип активного захвата, когда захватное устройство движется к летящему объекту с максимальной скоростью, не минимизирует силу удара, поэтому хрупкий объект может быть поврежден во время захвата. Активный захват может применяться для прочных предметов и прочных устройств захвата, которые не могут быть повреждены после столкновения на скорости несколько десятков м/с.

Следующий значительный исследовательский проект, касающийся захвата объектов в полете, был выполнен группой из Института робототехники и мехатроники Немецкого аэрокосмического центра [Fre01, Bae10, Bir11, Bae11]. В этом проекте рассматривался большой пространственный масштаб, чем в предыдущем; первоначально были исследованы броски на несколько метров. Из-за большого расстояния от рабочего пространства захвата и очень быстрой обработки, захват был не интерактивным, а предопределенным заранее. Прогнозирование было применено для переопределения траектории захвата.

В работе [Fre01] расширенный фильтр Калмана использовался для оценки и прогноза положения шара. Объект бросался с номинальной скоростью 7 м/с и под углом 45° к горизонту. Объект находился в полете в течение 0.8–1.0 с и за это время преодолевал расстояние

около 5 метров. Для наблюдения за траекторией использовалась стереосистема с размещением камер по вертикали на расстоянии друг от друга 1 м (показано на рис. 9). Угол поворота системы камер был равен  $90^\circ$ . Точность позиционирования шара при описанной настройке составила около 3 см. Распознавание объектов производилось на основе сравнения текущего кадра с эталонным изображением. Дифференциальное изображение (то есть разность между текущим и эталонным изображениями) делится на области. Область, наиболее подходящая для шаблона объекта, считается его местоположением на изображении. Частота кадров системы камер была стандартной (25 кадров в секунду), что соответствует обработке 50 изображений в секунду.

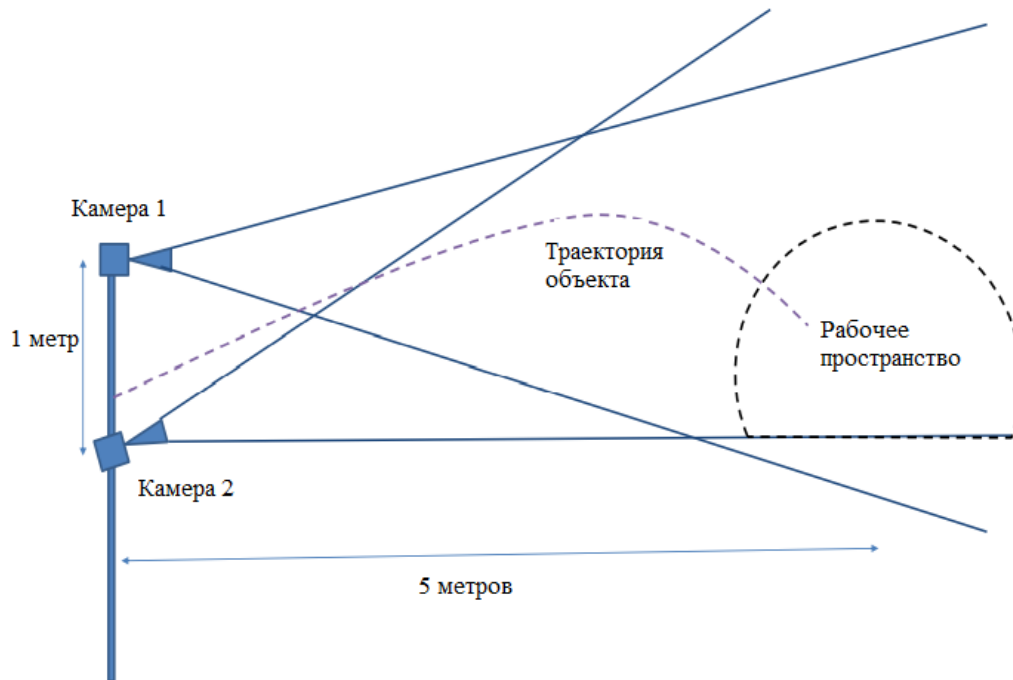


Рис. 9 Схема работы из [Fre01].

Алгоритм прогнозирования был основан на модели, учитывающей гравитацию и сопротивление, выраженной уравнением (10), которое численно решается с помощью интегрирования методом Эйлера. Эта модель движения была встроена в расширенный фильтр Калмана. Точка захвата генерируется, когда фильтр сообщает о достаточности достигнутой ковариации. Точка захвата не должна находиться близко к границе рабочего пространства или к базе робота. Затем она передается на систему управления роботом, чтобы определить траекторию захвата (планирование движения основано на интерполяции обратной кинематики). Весь цикл обработки данных (извлечение изображений, реконструкция стерео, прогнозирование и управление роботом) занял 75 мс.

Маленькая корзина была установлена на концевом эффекторе робота для сбора мячей. В экспериментах по захвату не использовалось метательное устройство. Мяч был брошен людьми. Это означает, что точка броска не зафиксирована в пространстве, и не существует номинальных значений угла и скорости броска. В этих экспериментах около 67% бросков были успешными.

Дальнейшее развитие устройства захвата было представлено в [Bae10]. В работе для захвата использовалась робототехническая рука с 4 пальцами, имеющая в общей сложности 12 DoF. Задача определения движения захвата рассматривается как сложная задача нелинейной оптимизации. Она решается непосредственно по результатам прогнозирования без указания промежуточных этапов выбора точки захвата и определения конфигурации захвата.

Геометрическая настройка и алгоритм прогнозирования такие же, как и в работе [Fre01]. Точность предсказания в 2 см, которой достаточно для успешного захвата робототехнической

рукой, согласно [Bae10, с. 2595]), обычно достигалась за 100 мс до момента захвата. Из-за этого небольшого временного интервала движение захвата должно начаться до окончательного результата прогнозирования, а затем должно быть пересчитано на основе новых данных прогнозирования. Поскольку процесс оптимизации требует больших вычислительных затрат, он был реализован на 32 ядрах процессора. Оптимизация прекращается после 60 мс поиска наилучшего решения. Показатель успеха был увеличен до более чем 80%.

В [Bir11] концепция была расширена для параллельного отслеживания и захвата нескольких летящих мячей, и то же самое исследование уже было кратко представлено в [Bae11]. Мячи ловит человекоподобный робот Rollin', представленный Джастином в [Bor09]. Камеры установлены на голове робота. Он поймал два летающих мяча одновременно. В [Bir11] для ловли мяча была применена концепция отслеживания, основанная на обнаружении круга. Он был введен в работе [Bir09] в приложении для наблюдения за спортивными матчами. После анализа изображения все круги вставляются в трекер с multi-hypothesis, основанный на фильтре Калмана. Вероятность успеха снова составила около 80%. Позже в [Bir11a] был введен новый алгоритм отслеживания, основанный на байесовских вероятностных моделях, который позволил выполнять отслеживание с аналогичной точностью и на 55% быстрее. В [Bae11a] представлено несколько улучшений всей системы. Концепция отслеживания из работы [Bir11a] воплощена в жизнь. Другие улучшения в основном решают проблемы ситуации, когда «все движется», включая систему камер, установленную на голове движущегося робота.

В рамках проекта по захвату объектов человекоподобными роботами [Fre01, Bir09, Bae10, Bar11, Bar11, Bar11a, Bae11a] получены важные результаты. Точность и производительность отслеживания и прогнозирования, по-видимому, приближаются к ограничениям физических моделей гравитационного сопротивления. В этом проекте также рассматриваются многие специфические аспекты, не рассмотренные на текущем этапе проекта TbT, такие как способность одной системы мгновенно ловить несколько мячей, применение человекоподобных робототехнических систем для этой задачи и ситуация, когда основание устройства захвата и система видения перемещаются. Эти достижения, возможно, могут быть полезны при разработке принципов транспортировки в будущем.

Другое приложение для ловли мячей для человекоподобных роботов было описано в [Ril02]. Цель состояла в том, чтобы исследовать человекоподобное поведение робота при ловле мяча. Движение захвата робота сходится с движением захвата человеческой руки, представленным в [Kaj99]. Для ловли мяча использовалась бейсбольная перчатка. Система стереовидения обеспечивала измерение положения со скоростью 60 кадров в секунду. Отслеживается рука бросающего, в данном случае человека, а также мяч. Предсказание было сделано с помощью подгонки по параболе. Пиковые скорости конечного эффектора во время захвата обычно составляли от 1.0 до 2.5 м/с. Движение захвата обычно завершалось за 350–850 миллисекунд.

В [Mor04] представлена стратегия захвата с использованием системы монокулярного зрения. Предлагаемый подход к отслеживанию мяча называется увеличением угла взгляда (Gaining Angle of Gaze - GAG). Эта стратегия аналогична стратегии ловли бейсболиста, описанной в [Cha68]. Камера «рыбий глаз» установлена непосредственно на руке манипулятора. При ежесекундном отслеживании инструкции манипулятора определяются таким образом, чтобы угол взгляда сохранялся в заранее заданном постоянном диапазоне. Это означает, что существуют два основных этапа движения захвата, например, достижение целевого угла и последующее поддержание его постоянным. Таким образом, вопрос определения положения мяча в 3D-пространстве не принимается во внимание. Движение захвата прекращается, когда мяч покидает поле зрения камеры. В этот момент устройство захвата готово поймать мяч. Следовательно, ловля на основе GAG является одним из методов, который не занимается про-

гнозированием в [Ima04]. Эти методы требуют, чтобы реакция робота на визуальную информацию была невероятно быстрой. Однако робот в [Mor04] смог поймать мяч с помощью концевых эффекторов, движущегося с относительно низкой скоростью 0.6 м/с.

В [Her09] система монокулярного зрения (камера с частотой 70 кадров в секунду) использовалась для отслеживания баллистического объекта (подброшенной монеты), чтобы поймать его. Эта работа претендовала на то, чтобы быть первой, применившей монокулярное позиционирование для летающих объектов, однако исследование [Var08] уже было опубликовано. Была применена менее сложная модель оценки, чем в [Var08], например, подгонка параболы с рекурсивной оценкой наименьших квадратов. Движение захвата выполнялось робототехнической рукой 6-DoF со скоростью до 1.0 м/с. Это намного меньше скорости объекта, поэтому был использован жесткий захват. Парабола подгоняется к проекционной модели, т. е. используется для определения 3D-координат летящего тела. Точность прогнозирования увеличивается с течением времени, поэтому движение руки корректируется в соответствии с новыми данными от предсказателя.

Исследовательская работа [Smi07] сосредоточена на разработке программного обеспечения и аппаратной платформы, которая позволяет выполнять быстрое движение захвата. Ловля считалась телеуправляемой, но в качестве эталона также была реализована автономная ловля мяча. Для прогнозирования была применена параболическая модель, основанная на измерениях траектории, выполненных камерами с частотой 50 кадров в секунду. Для обработки данных зарезервирован временной диапазон 300 мс. В общей сложности 200 мс из них необходимы для захвата 10 кадров, а остальные 100 мс – для получения координат, прогнозирования и генерации движения захвата. Для выполнения захвата зарезервировано в общей сложности 500 мс. Для рабочего пространства захвата использовался квадрат размером 0.6×0.6 м. Цель состояла в том, чтобы создать устройство захвата, которое могло бы выполнять «движение корпусом», перемещаясь из нижнего левого в верхний правый угол рабочего пространства (то есть движение против силы тяжести) за 500 мс (то есть достигая расстояния около 90 см за это время). Информация о цвете использовалась для обнаружения мяча, и для этого изображение было переведено из цветового пространства RGB в цветовое пространство HSV. Весь кадр не был обработан алгоритмом распознавания, только небольшое подокно, в котором может появиться мяч. Положение подокна на изображении определяется положением объекта в предыдущем кадре последовательности. В экспериментах по захвату 25 из 32 брошенных мячей были успешно пойманы. Распознавание на основе цвета с помощью параболической модели также было применено позже в [Kao13], но для статистической оценки вместо метода наименьших квадратов использовался линейный фильтр Калмана.

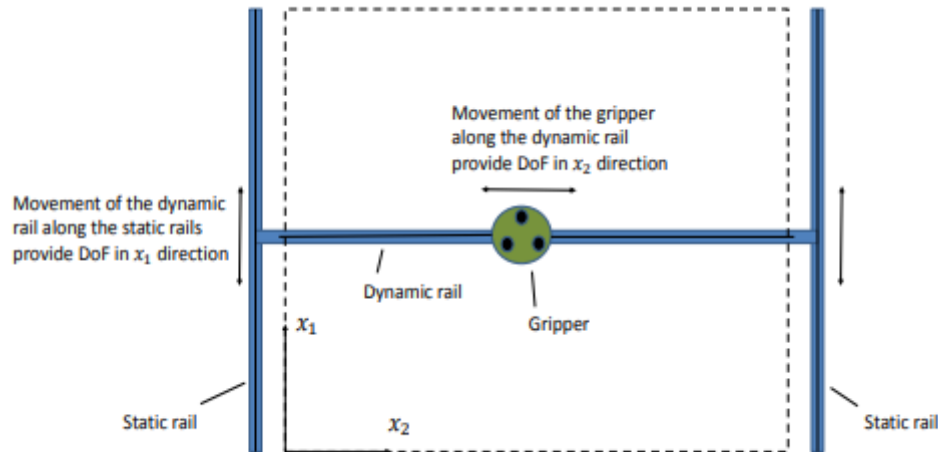
Параболическая подгонка с использованием рекурсивного LS также использовалась для прогнозирования в [Bat10]. Установка позволяет ловить предметы (в экспериментах использовался баскетбольный мяч, брошенный человеком) незаметным способом, балансируя предмет на плоской поверхности. Круглая пластина радиусом 17 см используется в качестве концевых эффекторов, установленного на роботе 6-DoF. Показатель успешности составил примерно 35%, но этот результат несравним с другими данными об успешности, например, в [Nov91] или [Bae10], поскольку задача ловли для ловли без захвата, основанной на балансировании, намного сложнее, чем для захвата.

В [Kim12, Ekim14] рычаг 7-DoF KUKA LWR 4+ использовался для захвата летящих предметов различной формы: молотка, бутылки, теннисной ракетки и продолговатой коробки. Были успешными 52 из 71 (73.2%) захватов.

## 4.2. Транспортировка броском

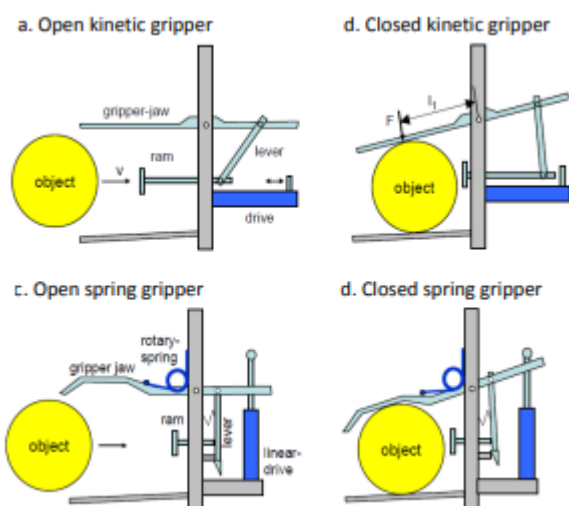
Как упоминалось ранее, способ транспортировки с помощью метания был введен Фрэнком в 2006 г. С тех пор работа над TbT была начата двумя научными группами в Университете Рейнхольда-Вюрта в Кунцелзау ([Fra06, Fra08, Fra11]) и в Институте компьютерных технологий Венского технологического университета ([Pon11, Pon13, Mir13]).

На начальном этапе исследовательского проекта была применена установка захвата на базе портального робота 2DoF [Fra06, Fra07, Var08, Fra08, Fra08a, Var09]. Эти роботы способны перемещаться в пределах декартова квадрата и часто используются в качестве погрузочно-разгрузочных машин в промышленных условиях [Fra07, Fra08a]. Схема декартового портального робота 2DoF показана на рис. 10. Размер рабочего пространства составляет (по горизонтали) 100 см на (по вертикали) 80 см. Максимальное ускорение и скорость конечного эффектора составляют  $25 \text{ м/с}^2$  и  $4 \text{ м/с}$  соответственно при полезной нагрузке 5 кг.



**Рис. 10** Портальный манипулятор 2-DoF, используемый в [Fra 07]: перемещение динамического рельса (dynamic rail) по статическим рельсам (static rail) в направлении  $x_1$ ; перемещение захвата (gripper) по динамической направляющей в направлении  $x_2$ .

Устройство захвата имеет три хватные губки, которые закрываются, когда предмет касается центра захвата. Закрытие может быть выполнено с использованием кинетической энергии объекта (верхняя часть рис. 11) или кинетической энергии предварительно натянутой пружины (нижняя часть рис. 11).

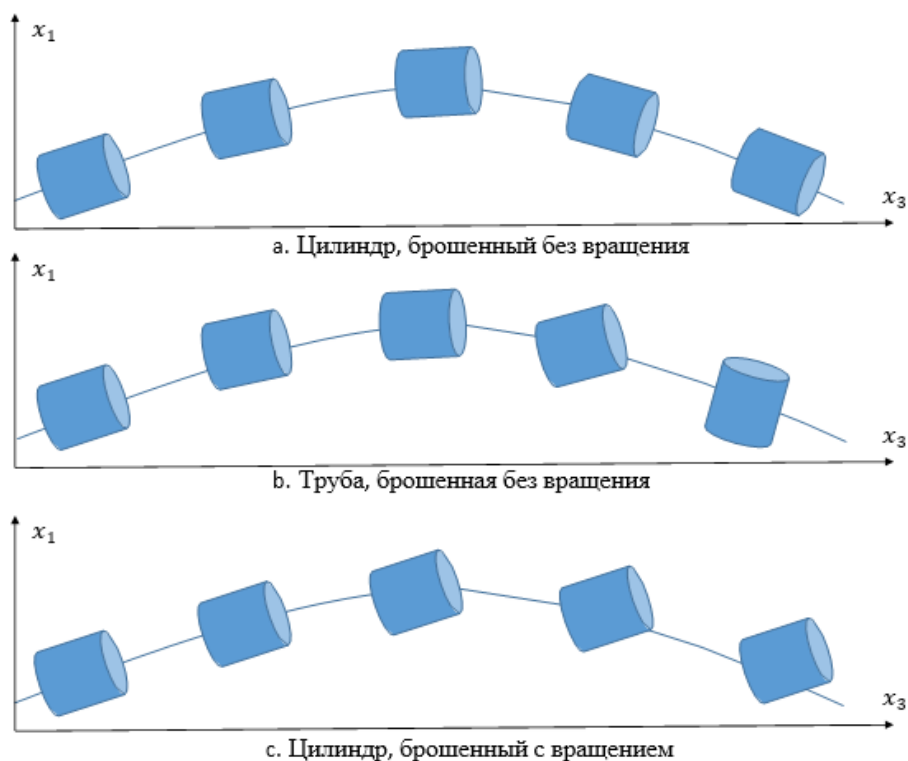


**Рис. 11** Принцип захвата из [Fra 07]:  
 a – открытый кинетический захват;  
 c – открытый пружинный захват;  
 d – закрытый кинетический / пружинный захват.

Эти захваты способны закрываться в течение 4.5–14 мс и 5 мс соответственно. Время закрытия первого захвата зависит от массы и скорости объекта. Если его кинетическая энергия высока, он быстро закроется. Соответствующее соотношение для пружинного захвата обнаружено не было.

Следовательно, пружинный захват может быть предпочтительнее для легких предметов, в то время как более тяжелые предметы можно эффективно захватывать, используя их собственную кинетическую энергию. Техника, связанная с монокулярной физикой, описанная в [Var08] и обсуждаемая в подразделе 3.3, была применена для отслеживания мяча и прогнозирования его траектории.

Установка была следующей: предметы весом до 60 г метались со скоростью до 10 м/с на расстояние до 3 м. Таким образом, время, необходимое для транспортировки объекта, составляло около 300 мс. Были предложены две стратегии управления: «упрощенная» (сделано предположение о линейном увеличении точности прогнозирования) и «реалистичная» (экспоненциальное увеличение). Обе стратегии обеспечивают плавное перемещение конечного эффектора к заданной точке захвата. В результатах диссертации Бартлетта [Bar 11, с. 125] 60% мячей, брошенных человеком, были пойманы. Дальнейшее развитие исследовательский проект получил как в Венском технологическом университете, так и в Университете Хайльбронна. Работа группы Хайльбронна кратко изложена в [Fra09, Fra11, Fra11a Fra12]. В этих работах внимание было сконцентрировано на объектах цилиндрической формы. В [Fra09] представлена специфическая установка для метания этих объектов и изучены аэродинамические свойства воздушных цилиндров. Эксперименты показали, что угол атаки для линейно брошенного цилиндра близок к нулю во время полета, то есть ориентация объекта соответствует текущему направлению полета (рис. 12, *a*). Модель движения цилиндра была создана с учетом силы тяжести и сопротивления воздуха. Поскольку угол атаки равен нулю, влияние подъемной силы воздуха в модели движения не учитывалось. Однако сравнение модели движения с измерениями показало, что через 3 м траектория объекта отличается от теоретических значений на 22–36 мм. Авторы предполагают, что эти отклонения могут быть вызваны влиянием подъемной силы. Когда вместо цилиндра была брошена открытая труба, через некоторое время она начала падать (рис. 12, *b*). Когда цилиндр был брошен со скоростью 35 оборотов в секунду (идея была навеяна использованием нарезов для стабилизации ракет), он не сохранял угол атаки вдоль траектории, но сохранял свою ориентацию в мировой системе координат (рис. 12, *c*). Такое поведение соответствует свойству маховика – сохранять постоянную ориентацию оси вращения в пространстве (также используется в гироскопах).



**Рис. 12** Динамика направления цилиндра и трубы в зависимости от условий полета.

В [Fra12] для транспортировки цилиндра использовалась установка с линейным метательным устройством 1-DoF и поворотным улавливающим устройством 1-DoF. Сенсорная система не использовалась; метатель обеспечивал достаточный уровень точности для успешного

захвата. Оба робота управлялись с помощью общей системы управления, и через некоторое время после броска приводилось в действие движение захвата. В экспериментах эта система смогла поймать все 50 из 50 брошенных предметов. Авторы признают, что такая точность возможна только для цилиндрических объектов из-за их высокой аэродинамической устойчивости. Улавливание менее устойчивых объектов потребовало бы использования визуальной обратной связи [Fra12, с. 5269].

### 4.3. Обсуждение

Обзор существующих концепций робототехнического захвата приведен в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение подходов к роботизированному метанию и ловле

№ п/п	Учреждение	Источник	Показатель успеха	Направленность и вклад	Объекты
1	МТИ	[Nov91]	75–80%	Первый роботизированный улавливатель, параболический фитинг	Маленький мяч
2	Токийский университет	[Nis97]	Не указано	Первое человекоподобное устройство захвата	Маленький мяч
3	Токийский университет	[Nam03a]	Не указано	Визуальная обратная связь за 1 мс; захват объектов в движении	Маленький мяч
4	Немецкий аэрокосмический центр	[Fre01] [Bae10] [Bir11]	67–80%	Оценка KF, моделирование сопротивления воздуха, одновременная ловля нескольких мячей	Маленький мяч
5	Научно-исследовательский институт передовых телекоммуникаций, Киото	[Ril02]	Не указано	Отслеживание руки бросающего, приближение к стратегии ловли человеком	Маленький мяч
6	Токийский университет	[Mor04]	Не указано	Захват только на основе информации об угле обзора	Маленький мяч
7	Токийский университет	[Her09]	Не указано	Подгонка параболы к измерениям монокуляра	Подброшенные монеты
8	Королевский технологический институт, Стокгольм	[Smi07]	78% (25/32)	Телеуправляемый захват мяча, разработка специальной быстро улавливающей руки, распознавание мяча на основе информации о цвете HSV	Маленький мяч
9	Мюнхенский технологический университет	[Bat10]	35%	Нехватательная ловля	Баскетбольный мяч
10	Швейцарский федеральный технологический институт, Лозанна	[Kim14]	73% (52/71)	Захват объектов сложной формы, определение ускорения объекта на основе обучения, отслеживание на основе маркеров	Молотки, бутылки, теннисные ракетки
11	Университет Хайльбронна, Венский технологический университет	[Fra06] [Fra07] [Bar08] [Fra08a]	60%	Промышленная транспортировка путем переброса, монокулярное отслеживание с привязкой к физической модели, захват декартовым роботом 2 DOF	Маленький мяч
12	Университет Хайльбронна	[Fra12]	100% (50/50)	Объекты в форме цилиндра, точное метание	Цилиндр

Показатель успеха указан в процентах и, где указано, – в абсолютном количестве брошенных и пойманных мячей. Цифры не совсем точны в том, как они сравнивают алгоритмы, потому что они зависят от настройки (например, сложнее поймать мяч с помощью захвата, чем с помощью сбора в корзину), но они помогают оценить способности существующих

устройств захвата. Единственное устройство, которое преодолело рубеж в 80% успешных захватов, было в [Fra12], где все брошенные предметы были пойманы. Был выявлен следующий недостаток: цилиндрические объекты, брошенные без вращения, обладали очень высокой аэродинамической устойчивостью по сравнению с другими объектами. Авторы [Kim12] предполагают, что применение концепции к менее стабильным объектам потребует использования отслеживания объектов для корректировки движения захвата.

Видно, что в большинстве решений в качестве объекта используются маленькие мячи. Под термином «маленькие мячи» здесь понимается мяч, похожий по размеру на теннисный или бейсбольный (меньшие по сравнению с большими мячами, используемыми в футболе и баскетболе). Этот термин используется, потому что в статьях не ясно, использовался ли теннисный мяч; однако по изображениям и характеристикам мячей видно, что они были примерно того же размера, что и теннисный.

Сравнение различных подходов к отслеживанию объектов приведено в табл. 2.

Таблица 2

**Сравнение подходов к отслеживанию объектов  
для робототехнического улавливания**

№ п/п	Источник	Сенсорное решение	Технологическое решение	Частота, кадров в секунду
1	[Nov91]	Стереовидение	Не выяснено	30
2	[Nis97]	Стереовидение (несинхронизированное), оценка дальности монокуляра на основе размера объекта	Не выяснено	30
3	[Ish96] [Nam99] [Nam03a]	Одиночная камера с прямым подключением фотоприемников к блоку обработки	Обнаружение движения на высокоскоростной последовательности изображений	1000
4	[Fre01] [Bir11]	Стереовидение	Сравнение с эталонным изображением, преобразование Хафа	50
5	[Ril02]	Цветное стереовидение	Вычисление 3D-цветового центроида	60
6	[Mor04]	Монокулярное зрение (вообще без 3D-реконструкции)	Извлечение информации об угле взгляда	30
7	[Her09]	Monocular vision with parabolic motion model	Не выяснено	70
8	[Smi07] [Bat10]	Цветное стереовидение	Распознавание шаров на основе информации о цвете HSV	150
9	[Bar08]	Монокулярное зрение с моделью баллистического движения	Hough transform	215

Все аспекты, связанные с 3D-реконструкцией, упомянуты в колонке «сенсорное решение», поскольку 3D-реконструкция зависит от настройки датчика. Колонка «решение для обработки» соответствует тому, как решается задача распознавания объекта на изображении. Не ясно, как координаты объектов извлекаются из изображений в некоторых решениях работ [Nov91, Nis97, Mor04]. Можно предположить, что для этой задачи применяются аналогичные методы, такие как обнаружение движения или преобразование Хафа. Разделение поля зрения камеры (Field of View – FoV) на подполя (Area of Interest – AoI) с меньшими размерами пикселей применяется в ряде работ, например [Bar08, Bat10], для сокращения вычислений. Подполе может быть статическим, если известно, что объект не может отображаться в какой-либо части поля зрения. В [Bar08] этот подход позволил увеличить доступную частоту кадров с 87 до 215 кадров в секунду. Подполе также может быть динамическим. В этом случае положение AoI в плоскости изображения корректируется в соответствии с новым положением объекта. Например, система видения от [Bat10] работает с окнами размером 180×180 пикселей вместо всего изображения размером 1280×1024.



Радикальный подход к увеличению частоты кадров предложен в [Ish96], где устраняется узкое место передачи изображения от датчика к контроллеру. Каждый сенсорный элемент напрямую подключен к определенному блоку обработки. Это увеличило фактическую частоту кадров до 1000 кадров в секунду. Данный подход требует специального аппаратного решения для системы видения, которое позволило бы осуществлять параллельную обработку в массовом масштабе. Имеющиеся в продаже цифровые камеры не позволяют напрямую подключаться к фотоприемникам, но передают данные датчиков в виде изображений. В любом случае, даже относительно медленные камеры со скоростью 50–70 кадров в секунду предоставляют полезную информацию о траектории объекта [Fre01, Ril02, Her09].

Очевидно, что приложению реального времени нет причин увеличивать частоту кадров, если время ожидания между кадрами меньше периода, необходимого для извлечения пространственной координаты объекта из кадра. Обнаружение мяча с преобразованием Хафа – хорошо известная методика, предназначенная для распознавания сферических объектов на изображениях и определения их центрального положения. Методы, основанные на цвете и движении, позволяют распознавать только определенные области изображения. Преимущество изображений, основанных на движении и цвете, заключается в меньших вычислительных затратах. С другой стороны, результаты работы [Var08] показывают, что преобразование Хафа будет работать правильно даже при частоте кадров 215 кадров в секунду.

Сравнение различных решений для выполнения движения захвата приведено в табл. 3.

Таблица 3

## Сравнение подходов к захвату объектов

№ п/п	Источник	Устройство захвата	Конечный эффектор	Тип захвата	Особенности стратегии захвата
1	[Nov91]	4-DoF-рука	Не уточнено	Пассивный Мягкий	
2	[Nis97]	5-DoF-рука	Корзина	Пассивный Жесткий	
3	[Nam03a]	4-DoF-рука	3-палая рука (3-суст. пальцы)	Активный Жесткий	Прямое определение движения по данным зрения
4	[Fre01]	7-DoF-рука	Корзина	Пассивный Жесткий	
5	[Bae10, 11]	7-DoF-рука	4-палая рука (3-DoF-пальцы)	Активный Жесткий	
6	[Ril02]	гуманоид	Бейсбольная перчатка	Пассивный Мягкий	Обучение человекоподобным движениям
7	[Mor04]	6-DoF-рука	Корзина	Пассивный Жесткий	
8	[Smi07]	Скоростная 6-DoF-рука	Корзина	Пассивный Жесткий	Перемещение эффектора в плоскостном окне
9	[Bat10]	6-DoF-рука	Плоская поверхность	Беззахватный Мягкий	
10	[Kim14]	7-DoF-рука	4-палая рука (4-DoF-пальцы)	Активный Жесткий	
11	[Fra07, 08a]	Gantry 2-DoF Cartesian robot	Механический захват	Активный Мягкий	
12	[Fra12]	1-DoF вращающаяся рука	Пневматический захват	Активный Мягкий	

Человекоподобный робот из [Ril02] имеет 4DoF на каждой руке и 2DoF на туловище. Стратегии захвата классифицируются в соответствии с двумя аспектами. Во-первых, захват может

быть жестким или мягким. Во-вторых, захват может быть пассивным. Конечный эффектор не имеет движущихся частей. Он сконструирован таким образом, что после перехвата объект хранится в нем. Например, конечный эффектор представляет собой установленную корзину в работе [Nis97]. Ловля также может быть активной. Конечный эффектор имеет движущиеся части, которые захватывают объект в момент перехвата. Этот захват может приводиться в действие контроллером робота, как в [Nam03a], выполняемым механически в соответствии с конструкцией концевой эффектора, как в [Fra07]), или без захвата, как реализовано исключительно в [Bat10], где объект был собран на плоской поверхности концевой эффектора, что было достигнуто путем балансировки. Управление многосуставными рычагами в большинстве случаев осуществляется с помощью обратной кинематики. Для мягкого захвата это означало расчет положений суставов и скоростей вращения, которые обеспечивали целевое положение и скорость конечного эффектора. Если применяется жесткий захват, то задача упрощается: нет необходимости регулировать скорость конечного эффектора.

В большинстве работ для захвата применяются робототехнические манипуляторы multi-DoF. Эти рычаги имеют 3D-рабочее пространство и способны обеспечить мягкую фиксацию. Использование активного захвата или пассивного сбора предмета в чашку зависит от способностей робота. Если есть задача, в которой роботу нужно поймать мяч, как это сделал бы человек, применяется ловящая робототехническая рука. Способность хватать рукой – очень специфическая и сложная робототехническая задача, требующая высокой степени точности предсказаний (2–3 см в соответствии с [Bae10]). Пассивный захват также позволяет собирать объект и оценивать траекторию объекта. Как правило, управляемый активный улов требует дополнительного композиционного элемента системы, например, руки в дополнение к метательному устройству, роботу и камерам. Для этого также требуется дополнительный алгоритмический блок, например, контроллер для захвата движения в дополнение к отслеживанию объектов, предсказателю и роботизированному планировщику траекторий. Пассивного варианта достаточно для обеспечения успешного захвата и первоначальной проверки других единиц.

## **5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПРИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОМ ЗАХВАТЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ БРОСКОМ**

В этом разделе рассмотрена задача прогнозирования и то, как она решается в рамках исследовательской работы. Информация о местоположении точки захвата в рамках современных подходов получается следующими тремя способами:

1. Точная регулировка бросающего устройства: Различия между различными траекториями лежат в пределах допустимой погрешности при ловле. Таким образом, ни предсказание, ни наблюдение траектории системой слежения не требуется [Frac12]. Эти системы обсуждаются в подразделе 5.1.

2. Прямое отображение из системы видения в систему управления движением без промежуточного этапа прогнозирования и определения точки захвата [Nam03a, Mor04].

3. Долгосрочное прогнозирование: часть траектории в рабочей области захвата оценивается на основе начальной части траектории. Большинство из этих предсказателей используют предопределенную физическую модель полета объекта, например, [Hov91, Nis97, Fre01, Ril02, Bar08, Her09] (обобщено в подразделе 5.2). Однако в некоторых решениях имеется операция обучения [Ким 12]. В подразделе 5.4 дается введение в прогнозирование ближайшего соседа. Разработка подхода ближайших соседей для прогнозирования траектории является одним из основных вкладов в этот тезис, поэтому в этом разделе также приведены аргументы в пользу его использования.

### 5.1. Захват без предсказания

При броске задача в первую очередь заключается в транспортировке объекта в заранее определенную область. В случае непрогнозируемого переноса путем броска объект, достигающий этой области, должен быть гарантированно пойман. Метание предметов – это специфическая робототехническая задача, разработанная в ряде решений, например, [Miy10, Kob11, Nem11, Zha12, Kan12]. Большая часть этих работ не была сосредоточена на обеспечении стабильной транспортировки предметов путем метания. В [Zha12] основная область применения заключается в конкретном планировании траектории для робота, и бросок считается одним из возможных применений. Аналогичная задача рассматривалась в [Kan 12] для человекоподобного робота с большим количеством DoF. Поэтому в большинстве из них указано только то, что «объект брошен в цель системой метания», и нет упоминаний о том, насколько точным был бросок, хотя приведена применимость стратегии метания в промышленных приложениях.

Точность была рассмотрена в [My 10] и [Nem11]. В первой работе в качестве бросающего устройства используется вращающийся рычаг 1-DoF. Траектория изменяется путем изменения положения объекта на рычаге. Норма погрешности составляла 3 мм после 21 броска. Расстояние броска не указано, однако из иллюстрации видно, что оно составляет не более нескольких десятков сантиметров. В исследовании [Nem11] была достигнута точность заброса мячей в корзину на 5 см. Ошибки объясняли неточностью зрения. Целью этой работы была разработка новой техники обучения движениям, и одним из примеров было бросание мячей в корзину.

В рамках проекта TbT точное метание разработано Торстеном Франком и др. [Fra09, Fra11, Fra11a, Fra12]. Это единственный исследовательский проект, который включает в себя глубокое исследование транспортировки с помощью высокоточного броска. В [Fra11a] линейное бросающее устройство 1-DoF из [Fra09] заменено специальным роботом 2DoF. Чаша с предметом лежит на конце рычага длиной 50 см. Бросок осуществляется вращательным движением этого рычага. Рычаг может достигать определенной угловой скорости, и, если он замедляется от этого значения, происходит запуск. Скорость запуска объекта задается угловой скоростью рычага в момент замедления, а угол броска зависит от ориентации рычага в момент замедления. Максимальная доступная скорость запуска составляет 25 м/с, хотя в экспериментах скорость обычно составляла от 8 до 12 м/с. Минимальная скорость 8 м/с обеспечивает центробежную силу, которая сильнее силы тяжести, поэтому мяч не выпадает из чаши перед запуском. Определение стартовой позиции для достижения определенной области назначения основано на модели движения с гравитационным сопротивлением, указанной в [Chu03]. В ходе экспериментов робот способен забрасывать мячи в лунки определенного размера. Размер не был уточнен в статье, но из иллюстрации видно, что они были размером в несколько десятков см в диаметре.

В [Fra12] устройство 1DoF использовалось для метания цилиндрических предметов. Модель полета объекта, используемая для настройки метательного устройства, была разработана в [Fra10]. Направление цилиндра следует за его вектором скорости из-за эффекта стабилизации плеча (см. рис. 12, *a*), поэтому цилиндр является стабильным аэродинамическим объектом, который можно рассматривать как точечную массу. Полет малых и тяжелых цилиндров может быть точно представлен с использованием даже параболических моделей [Fra10]. Прогнозирование легких цилиндров большего объема требует учета сопротивления воздуха. Фактически задача корректировки параметров запуска в [Fra10, Fra12] обратная прогнозированию траектории. Там запланированная будущая траектория используется в качестве входных данных для расчета требуемых параметров запуска, но не наоборот. Преимущество заключается в том, что, если модель немного неточна, параметры запуска можно изменить, чтобы устранить систематическую ошибку. Кроме того, допускаются сложные вычисления (например, использование оптимизации Левенберга – Марквардта в [Fra10]), поскольку они не выполняются в режиме реального времени во время отлова. Модель гравитационного

сопротивления с итерационным расчетом использовалась для моделирования траектории в [Fra12]. Высокая стабильность позволила обеспечить 100% успех в ловле после 50 бросков.

Возможность точного броска ограничена несколькими факторами. Прежде всего, форма брошенного объекта должна обеспечивать его аэродинамическую устойчивость. Конструкция бросающего устройства должна сводить к минимуму отклонения. Метод очень чувствителен к соответствующему расположению бросающего устройства и точке назначения. Для каждой из этих позиций необходимо произвести новую жесткую регулировку для бросающего и устройства захвата. Если используется мягкий захват (единственная известная реализация точного броска с мягким захватом – [Fra12]), то требуется точное знание времени полета объекта. В связи с этими факторами использование визуальной обратной связи было бы предпочтительнее для объектов нормальной формы и размера.

В устройствах захвата, основанных на видении, предсказание траектории объекта может быть пропущено, если реакция робота на визуальную информацию считается мгновенной. В [Mor04] захват реализован даже без 3D-реконструкции положения объекта. Камера установлена на устройстве захвата, и стратегия движения состоит в поддержании постоянного угла обзора объекта на изображении. Эта стратегия не учитывает абсолютную скорость летящего объекта, поэтому она неприменима для мягкого захвата.

Если применяется 3D-реконструкция, стратегия может состоять в перемещении робототехнической руки в направлении измеренного положения объекта. В работе [Имя99] эта стратегия была применена к объекту, перемещаемому человеческой рукой, и к летящему объекту в [Nam03a]. Этот подход полезен, когда шум процесса высок, поэтому нет смысла в долгосрочном прогнозе. Однако шум процесса для свободно летящего объекта относительно невелик. Робот не может быстро отреагировать, если скорость объекта и расстояние до него превышают предельные значения скорости. Максимальная скорость конечного эффектора KUKA LWR+ составляет примерно половину скорости объекта, поэтому он не может мгновенно реагировать на свое движение.

## 5.2. Прогнозирование с использованием физических моделей

Сравнение существующих методов прогнозирования представлено в табл. 4. Аббревиатура LS относится к оценке наименьших квадратов (Least Squares), а аббревиатура EKF – к расширенному фильтру Калмана (Extended Kalman Filter). В третьем столбце строки с термином «гравитация» или «гравитация и сопротивление» означают, что соответствующие модели движения учитывают соответствующие силы. Термин «SVR с ядром RBF» (Support Vector Regression and Radial Basis Function respectively – регрессия опорных векторов и радиальная базисная функция соответственно) описывает основанный на обучении метод оценки ускорений в [Kim14]. Прогнозирование ускорения означает, что вектор ускорения считается постоянным:

$$a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix} = \text{const}, \quad (20)$$

где  $\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$  и  $\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix}$  – векторы тангенциального и углового ускорения вращающегося тела.

Параболическая модель на самом деле представляет собой прогнозирование постоянного ускорения. Ускорение в этом случае считается равным  $g$  [Bat10] или определяется путем подгонки параболы к измерениям [Nov91]. Угловые ускорения в [Nov91, Nis97, Bat10] игнорируются, поскольку рассматриваются точечно-симметричные тела, поэтому прогнозирование ориентации не требуется. В [Her09] это также не учитывается, поскольку объект (монета) очень мал и может рассматриваться как точечная масса.

Таблица 4

**Сравнение подходов к прогнозированию траектории объекта  
на основе математических или физических моделей**

№ п/п	Источник	Система оценки	Модель движения
1	[Hov91]	LS	Параболическая
2	[Nis97]	LS	Параболическая
3	[Fre01]	EKF	Сила тяжести и сопротивление
4	[Ril02]	LS	Параболическая
5	[Her09]	LS	Сила тяжести
7	[Bat10]	LS	Сила тяжести
9	[Bar08]	EKF	Сила тяжести и сопротивление
10	[Pon09]	LS	Сила тяжести и сопротивление (axial separated)
11	[Kim12]	SVR with RBF kernel	Прогнозирование ускорение

Параболическая модель позволяет определять траекторию объекта на основе трех измеренных точек, даже не зная значения  $g$ . В предположении, что  $g$  известно, это может быть сделано на основе 2 пунктов. Обычно большее число измерений используется для повышения точности статистической оценки. Значение  $g$  получено путем подгонки параболы в работах [Hov91, Ril02]. На самом деле задача состоит в том, чтобы аппроксимировать данные полиномом второго порядка.

Неизвестность  $g$  позволяет учесть влияние сопротивления воздуха в модели. В фазе подъема влияние сопротивления сонаправлено силе тяжести. В фазе спуска его влияние противоположно силе тяжести. Полиномиальная модель предполагает, что общее ускорение объекта является постоянным. Это предположение может быть верным, если объект, как правило, не имеет существенного изменения вертикальной скорости на рассматриваемой части траектории; объект должен либо подниматься, либо опускаться на протяжении всего полета. Наиболее энергоэффективный и гибкий способ обеспечить транспортировку предмета перебросом – подбросить предмет вверх и поймать его во время спуска. Если объект брошен вниз, это сокращает максимальное расстояние броска и может ограничить организацию окружающей среды. Так происходит из-за того, что бросающее устройство должно располагаться над устройством захвата. Если объект пойман во время подъема, тогда это означает чрезмерное потребление энергии, поскольку фактическая скорость запуска намного выше, чем необходимо для достижения цели. Захват в этом случае должен располагаться над бросающим устройством. В случае восходящего броска и нисходящего захвата бросающее устройство может быть выше, ниже или же находиться на той же высоте, что и ловящее. Полиномиальные модели этих полетов относят к высоким систематическим ошибкам.

В разделе 5.1 отмечено, что включение сопротивления в модель движения объекта приводит к дифференциальному уравнению (10), которое не имеет аналитического решения. Предсказание траектории на основе этой модели может быть выполнено путем итеративного вычисления координат, как в работах [Fre01, Bar09], или с использованием простого предположения о независимости движения в различных координатах, как в [Pon09]. Значение коэффициента сопротивления требуется при использовании этих моделей и должно быть известно. В разделе 2.1 говорится, что определение этого коэффициента может оказаться серьезной проблемой даже для объекта простой формы. Для объектов общей и не очень аэродинамически устойчивой формы это определение становится проблемой, в особенности потому, что коэффициент зависит от ориентации объекта в воздушном потоке. На текущем этапе исследований используются в основном тела простой формы, но дальнейшее развитие предполагает, что необходимо заниматься бросками предметов различной формы. В связи с этим лучше не полагаться на коэффициенты сопротивления.

Полиномиальные модели движения, в отличие от рассмотренных выше, не требуют знания физических коэффициентов (как  $k$ , так и  $g$ ). Движение объекта выражается через (15), где все коэффициенты получены путем подгонки к данным. Эта модель позволяет учитывать влияние силы тяжести, а также все аэродинамические факторы на объект. Предполагается, что окончательное влияние этих факторов будет квадратичным, что также является упрощением. В работе [Pop09] эта модель продемонстрировала свою точность, но точная оценка весовых коэффициентов для (15) требует вычислительно дорогостоящей многомерной оптимизации.

Статистические фильтры, особенно расширенный фильтр Калмана EKF, используются для уменьшения влияния ошибок в [Fre01, Var09] и подгонки по методу наименьших квадратов (LS) в [Nov91, Pop09]. Для фильтрации требуется рабочая модель процесса. Это может быть не очень точно, и в этом случае составляющая систематической ошибки прогнозирования растет с увеличением расстояния. В оценщике LS найдено наилучшее соответствие для всех измеренных точек. Для сравнения, EKF является марковской оценкой, то есть прогноз делается на основе последней оценки положения и скоростей объекта и последнего измерения его положения. Влияние предыдущего измерения на результат является лишь источником последней оценки. Следовательно, ошибки, связанные с неточностью модели, могут быть результатом шума процесса.

### 5.3. Прогнозирование поведения нейронной сети

Нейронные сети позволяют обучаться на примере, обходясь без точной модели процесса, и учитывать неизвестные нелинейные зависимости в обучающем наборе. Для прогнозирования данных временных рядов могут использоваться различные нейронные сети с временными задержками (Time-Delays Neural Networks – TDNN). TDNN был предложен в [Sej87]. Нейронные сети обладают рядом свойств, которые делают их полезными для применения ТбТ:

- никаких точных предварительных моделей процесса не требуется, сеть сама создает прогнозирующую модель в процессе обучения;
- нейронные сети могут легко справляться с нелинейными процессами;
- хотя процесс обучения может занять некоторое время, обученные предсказатели могут работать очень быстро, в особенности, если они реализованы в аппаратном обеспечении.

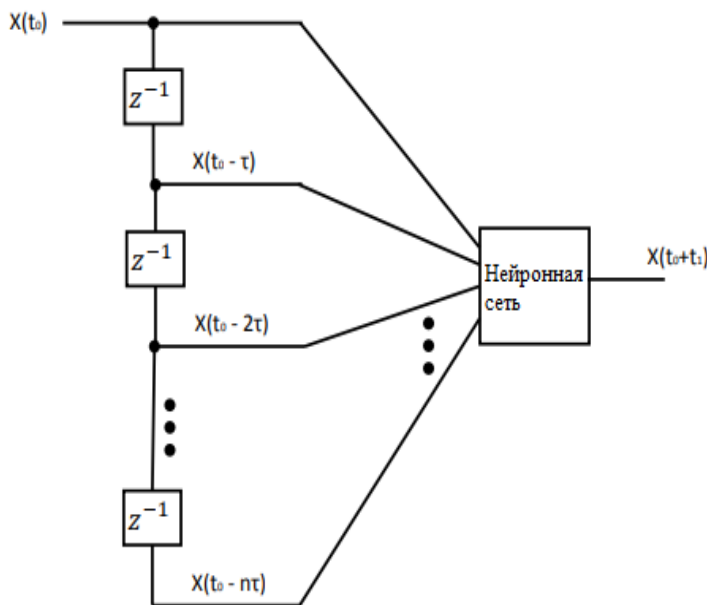


Рис. 13 Типичная архитектура предсказателя нейронной сети.

Типичная архитектура TDNN показана на рис. 13. Сетевой вход состоит из эталонных измерений за разное время, предоставляемых цифровой линией задержки. Линия временной задержки состоит из элементов задержки  $Z^{-1}$ . Каждый элемент обеспечивает задержку на определенную единицу времени  $\tau$ , следовательно, на сетевой вход подается ссылка на координаты объектов  $\{X(t_0), X(t_0 - \tau), X(t_0 - 2\tau), \dots, X(t_0 - n\tau)\}$ . Сеть должна предсказать значение этих координат  $X(t_0 + t_1)$  через фиксированный промежуток времени  $t_1$  после текущего момента. Если наблюдается траектория объекта, входными данными будет последовательность измерений, извлеченных из кадров наблюдателя [Mir13]. Величина  $\tau$

равна межкадровому периоду наблюдателя или частоте кадров наблюдателя в степени 1. Величина  $t_1$  – время, которое требуется объекту для достижения рабочей области захвата.

Предсказатель траектории нейронной сети был разработан и смоделирован автором [Mir13]. Поскольку параметры инициализации были неизвестны, в потоке моделирования использовались прямые сети. Программное обеспечение для моделирования и модель прогнозирования были созданы с помощью программы MATLAB. Были предложены два типа предикторов. Первый предиктор состоит из трех отдельных сетей, каждая из которых имеет один динамический вход и один выход. Каждая из сетей предсказывает одну из трех пространственных координат. Второй предиктор включает в себя одну сеть с тремя ссылками на входы и тремя выходами, предсказывающую значения всех трех координат [Mir13].

Увеличение количества слоев до более чем двух приводит к увеличению времени обработки и на деле не повышает точность. Следовательно, для приложения прогнозирования критической по времени траектории была предложена нейронная сеть с одним скрытым слоем. Количество нейронов, которые обеспечивают наилучшую точность для каждой сети, было определено в предварительных экспериментах: 6 нейронов для прогнозирования значения в  $x_1$ , 2 нейрона для прогнозирования значения в  $x_2$ , 6 нейронов для прогнозирования значения в  $x_3$  и 4 нейрона для комплексного прогнозирования. Стандартное отклонение для пространственно-разделенного прогноза составляло от 26 мм для высокоточного имитируемого броска до 74 мм. Для броска низкой точности средняя ошибка комплексного прогнозирования составляла от 24 до 89 мм соответственно [Mir13].

Результаты показывают дополнительные аспекты NNTP [Mir13]:

- при использовании НРТ нейронная сеть выдает результаты, которые можно использовать в работе реальной системы захвата;
- чем точнее бросок, тем точнее захват;
- предиктор с пространственным разделением показал точность лучше, чем комплексный предиктор;
- использование более рассредоточенных образцов обеспечивает лучшее обучение;
- чем точнее входные данные целевых частей траекторий обучения, тем лучше обучение в целом.

Обработка 100 кадров заняла около 0.7 мс для сложной нейронной сети и около 1.2 мс для пространственно-разделенной модели даже в таком относительно медленном приложении, как MATLAB. Такие параметры позволяют пересчитывать прогноз после каждого нового кадра. Размер ошибки может быть отклонен точной регулировкой бросающего устройства, однако недостатком NN является то, что это, по сути, «черный ящик». Трудно интерпретировать результаты, так как NN сама создает функцию вывода на основе обучающих наборов данных. В этом случае трудно адаптировать механизм прогнозирования к изменяющимся параметрам, например, частота кадров измерительной системы, форма объекта и т.д. Для первоначального построения гибкого предсказателя на основе выборки желательнее простое и поддающееся интерпретации решение. Одним из простейших и наиболее интерпретируемых методов принятия решений на основе выборки является « $k$  ближайших соседей» ( $k$  Nearest Neighbors – kNN).

#### 5.4. Предпосылки для использования алгоритма ближайших соседей

Алгоритм « $k$  ближайших соседей» (kNN) изначально был изобретен как метод классификации шаблонов [Cov67]. С 1960-х гг. он превратился в большое семейство различных алгоритмов, используемых для различных задач [Bha10]. Одной из таких задач является прогнозирование временных рядов (Time Series – TS). Ранее использование алгоритма kNN для прогнозирования изучалось в [Yak87]. С тех пор он применялся для различных задач, связанных со временными рядами, например, для прогнозирования погоды [Acc03], прогнозирования дорожного движения [Guo12] и спроса на электроэнергию [Alq13, Fuj14], анализа электрокардиограммы [Fae08] и т.д.

Для алгоритма ближайших соседей набор данных выборок собирается до решения задачи. Задача классификации означает, что существует необходимость связать вектор входных данных с определенной категорией (набор категорий конечен). Для классификации kNN набор данных имеет вид  $\{X_1, Y(1)\}, \{X_2, Y(2)\}, \dots, \{X_n, Y(n)\}$ , где  $X_i$  – вектор входных данных, а  $Y(i)$  – категория, взятая из  $C = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_k\}$ . Когда классификация текущего образца  $X_c$  выполнена, задача состоит в том, чтобы определить  $Y(c)$ . Если используется правило одного ближайшего соседа (1-NN), из набора данных берется вектор  $X_i$ , который наиболее похож на  $X_c$  (он называется «ближайший сосед»), и его категория  $Y(i)$  связана с текущим входом. Термины «близость» или «сходство» здесь означают, что расстояние (Евклидово, манхэттенское, махаланобисское и т. д.) от  $X_c$  до  $X_i$  меньше, чем расстояние до любого другого вектора из набора данных. Если количество взятых ближайших соседей больше одного, каждый из них голосует за свою категорию, и категория с максимальным количеством голосов ассоциируется с  $X_c$ .

Взвешенный классификатор  $k$  ближайших соседей (kNN) был предложен в [Ba1 78]. В этом алгоритме вес каждого соседа зависит от расстояния до  $X_c$ .

Алгоритм регрессии kNN отличается от классификатора kNN следующим образом:  $Y$  здесь берется не из конечного набора категорий, а из бесконечного набора действительных чисел. Это может быть скаляр или вектор  $Y$ . Значение  $Y_c$  в регрессии kNN рассчитывается как среднее значение целевых значений соседей:

$$Y_c = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k Y_j. \quad (21)$$

В регрессии kNN в модель добавляются весовые коэффициенты:

$$Y_c = \sum_{j=1}^k w_j Y_j. \quad (22)$$

Обычно в методе WKNN рассматриваются все соседи, а не только ближайшие, но весовые коэффициенты могут применяться и для конечного подмножества примеров. В [Ba1 78] все выборки из набора данных голосуют за свои категории. В других реализациях алгоритма учитывается только конечное число ближайших соседей. Это позволяет снизить вычислительные затраты.

Прогнозирование временных рядов частично является случаем регрессии. Здесь  $Y$  и  $X$  представляют одни и те же параметры, но  $X$  соответствует его значениям, измеренным в прошлом, а  $Y$  – его неизвестным будущим значениям.

По сравнению с другими методами kNN является наиболее надежным. Основные преимущества kNN перечислены ниже:

1. Независимость от физической модели: kNN – это подход, основанный исключительно на опытах. Он не требует никаких знаний о правилах движения объектов. В этом и его преимущество по сравнению с аналитическими методами (полиномиальная подгонка, физическое моделирование, фильтры Калмана).

2. Сходство с обучением человека: Принцип обучения аналогичен тому, как люди учатся ловить мячи. Они накапливают знания, вспоминая свои предыдущие попытки, и решают, как поймать мяч, вспоминая, как делали это в прошлом [Gil99]. Люди ловят мяч лучше, чем любая существующая робототехническая система, поэтому объединение их стратегий позволит усовершенствовать разработанную систему.

3. Простота процесса обучения: В обычной версии алгоритма предыдущие образцы просто хранятся в базе данных. В алгоритм обучения могут быть добавлены некоторые преобразования, однако основной принцип остается прежним: обучение заключается в накоплении информации о предыдущих опытах в памяти. В этом отличие от других интеллектуальных алгоритмов (например, нейронные сети), где обучение подразумевает корректировку параметров сложной модели в соответствии с данными выборки.

4. Хорошая интерпретируемость: Легко определить причину решения, принятого предсказателем. «Мы делаем данный прогноз, так как наша траектория  $C$  похожа на траектории  $A$  и  $B$



из базы данных». Это рассуждение подходит для задачи прогнозирования траектории. Процесс полета детерминирован, и в подобных условиях траектории выглядят аналогично.

5. Свобода от переобучения: Проблема переобучения возникает в статистических методах (например, полиномиальных моделях или фильтрах Калмана) или методах, основанных на обучении (нейронные сети), где создаются любые модели движения. Эти модели имеют определенные параметры, которые корректируются в соответствии с данными выборки. Если выборочные данные являются ошибочными, случайные отклонения параметров могут быть обнаружены как детерминированные. В этом случае модель прогнозирования хорошо работает с выборками из обучающей выборки, но выдает высокий показатель ошибок при прогнозировании новых траекторий. Поскольку в kNN не используется конкретная модель процесса, такой проблемы не наблюдается.

6. Простота операции прогнозирования: В случае если имеется один ближайший сосед, то значение прогноза просто равно соответствующему значению соседней траектории. В случае более высокого  $k$  прогнозирование включает операцию сложения. Никаких сложных математических операций, таких как подгонка кривой, не требуется. Люди не делают сложных вычислений для того, чтобы поймать мяч, поэтому можно избежать сложных моделей и при этом правильно прогнозировать траектории.

Основная проблема при реализации предиктора на основе нейронной сети связана с требованием, чтобы текущая траектория сравнивалась со всеми траекториями из набора данных. Значит, если набор данных большой, то объем вычислений будет невероятно большим. Следовательно, потребность в памяти для обработки наборов данных также будет довольно большой. Чтобы преодолеть эти проблемы, в [Bha09] внесены различные улучшения в базовый алгоритм. В [Bha09] подходы в основном касаются классификации, а не регрессии. Все версии алгоритма делятся на структурированные и бесструктурные методы. В бесструктурных методах база данных считается целостным набором, и ко всем образцам применяется одна и та же процедура расчета расстояния. Размер набора данных уменьшается за счет исключения образцов, которые чрезмерно похожи на другие образцы, и это означает, что потенциальная информация, которую они хранят, уже содержится в других образцах [Chi79, Alp97, Ang05]. В структурированных методах набор данных преобразуется таким образом, чтобы алгоритм мог выполняться быстрее. Обычно набор разбивается на разделы с использованием некоторых методов разбиения на основе дерева [Spr91]. Листья дерева содержат информацию о соседних образцах, а внутренние узлы используются для быстрого поиска ближайших соседей. Большинство методов разбиения на основе дерева имеют дело с листьями, сформированными членом определенного класса, и поэтому неприменимы для регрессии и прогнозирования временных рядов. Древовидная структура дискретна и может привести к ошибкам дискретизации.

## 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 (Уфимский университет науки и технологий) за полезные замечания и поддержку.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- [Мир24] Миронов К. В. Transport-by-Throwing – робототехнический способ перемещения предметов перебросом: обсуждение научно-технической задачи // СИИТ. 2024. Т. 6. № 1(16). С. 43-53. EDN QGFZBW.
- [Acc03] Accadia, C., Mariani, S., Casaioli, M., Lavagnini, A., Speranza, A.: Sensitivity of Precipitation Forecast Skill Scores to Bilinear Interpolation and a Simple Nearest-Neighbor Average Method on High-Resolution Verification Grids, *Weather and Forecasting*, Vol. 18, No. 5, pp. 918 to 932, October 2003.
- [Ach72] 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.
- [Ada04] Adan, A., Molina, F., Morena, L.: Disordered Patterns Projections for 3D Motion Recovering, *Int. Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission*, Thessaloniki, Greece, pp. 262 to 269, September 2004.

- [Ada05] Adan, A., Molina, F., Vazquez, A. S., Morena, L.: 3D Feature Tracking Using a Dynamic Structured Light System, Canadian Conf. on Computer and Robot Vision, pp. 168 to 175, May 2005.
- [Ala98] Always, L. W.: Aerodynamics of the Curveball: an Investigation of the Effects of Angular Velocity on Baseball Trajectory, Dissertation, Office of Graduate Studies, University of California, Davis, 1998.
- [Ala08] Alam, F., Subic, A. J., Watkins, S., Naser, J., Rasul, M.: An experimental and computational study of aerodynamic properties of rugby balls, WSEAS Transactions on Fluid mechanics: Special Issue on Sustainable Energy and Environmental Fluid Mechanics, Vol. 3, No. 3, pp. 279 to 286, March 2008.
- [Ala10] Alam, F., Chowdhury, H., Moria, H., Brooy, R. L., Subic, A.: A Comparative Study of Golf Ball Aerodynamics, Australasian Fluid Mechanics Conf., Auckland, New Zealand, December 2010.
- [All93] Allen, P. K., Timcenko, A., Yoshimi, B., Michelman, P.: Automated Tracking and Grasping of a Moving Object with a Robotic Hand-Eye System, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 2, pp. 152 to 165, April 1993.
- [Alp97] Alpaydin, E.: Voting over Multiple Condensed Nearest Neighbors, Springer Artificial Intelligence Review, Vol. 11, No. 1, pp. 115 to 132, February 1997.
- [Alq13] Al-Qahtani, F. H., Crone, S. F.: Multivariate k-Nearest Neighbour Regression for Time Series data - a novel Algorithm for Forecasting UK Electricity Demand, 2013 Int. Joint Conf. on Neural Networks, Dallas, USA, pp. 1 to 8, August 2013.
- [And85] Andersson, R. L.: Real Time Intelligent Visual Control of a Robot, IEEE Workshop on Intelligent Control, New York, USA, pp. 1 to 6, August 1985.
- [Ang05] Angiulli, F.: Fast Condensed Nearest Neighbor Rule, Int. Conf. Machine Learning, Bonn, Germany, pp. 25 to 32, Aug. 2005.
- [Asa07] Asai, T., Seo, K., Kobayashi, O., Sakashita, R.: Fundamental aerodynamics of the soccer ball, Sports Engineering, Vol. 2007, No. 10, pp. 101 to 110, October 2007.
- [Asa10] Asai, T., Ito, S., Seo, K., Hitotsubashi, A.: Aerodynamics of a new volleyball, Procedia Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 2493 to 2498, June 2010.
- [Bae10] Baeuml, B., Wimboeck, T., Hirzinger, G.: Kinematically Optimal Catching a Flying Ball with a Hand-Arm-System, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, pp. 2592 to 2599, October 2010.
- [Bae11] 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 Int. Conf. on Robotics and Automation, Shanghai, China, pp. 3443 to 3444, May 2011.
- [Bae11a] Baeuml, B., Birbach, O., Wimboeck, T., Frese, U., Dietrich, A., Hirzinger, G.: Catching Flying Balls with a Mobile Humanoid: System Overview and Design Considerations, IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, Bled, Slovenia, pp. 513 to 520, 2011.
- [Bai78] Bailey, T., Jain, A. K.: A note on distance weighted k-nearest neighbor rule, IEEE Transactions Systems Cybernetics, Vol. 8, pp. 311-313, 1978.
- [Bar08] Barteit, D., Frank, H., Kupzog, F.: Accurate prediction of interception positions for catching thrown objects in production systems, IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics. Daejeon, Korea, pp. 893 to 898, July 2008.
- [Bar09] Barteit, D., Frank, H., Pongratz, M., Kupzog, F.: Measuring the Intersection of a Thrown Object with a Vertical Plane, IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics, Cardiff, UK, pp. 680 to 685, June 2009.
- [Bar09a] Barber, S., Chin, S. B., Carre, M. J.: Sports ball aerodynamics: A numerical study of the erratic motion of soccer balls, Computers & Fluids, Vol. 38, pp. 1091 to 1100, November 2008. [Bar11] Barteit, D.: Tracking of Thrown Objects, Dissertation, Faculty of Electrical Engineering, Vienna University of Technology, December 2011.
- [Bat10] Batz, G., Yaqub, A., Wu, H., Kuehnlentz, K., Wollherr, D., Buss, M.: Dynamic Manipulation: Nonprehensile Ball Catching, Mediterranean Conf. on Control & Automation, Marrakech, Morocco, pp. 365 to 370, June 2010.
- [Ben08] Benavoli, A., Farina, A., Ortenzi, L.: MLE in presence of equality and inequality nonlinear constraints for the ballistic target problem, Radar Conf., Rome, Italy, pp. 1 to 6, May 2008.
- [Bha10] Bhatia, N., Vandana: Survey of Nearest Neighbor Techniques, Int. Journal of Computer Science and Information Security, Vol. 8, No. 2, February 2010.
- [Bir09] Birbach, O., Frese, U.: A Multiple Hypothesis Approach for a Ball Tracking System, Springer Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5815, pp. 435 to 444, October 2009.
- [Bir11] Birbach, O., Frese, U., Baeuml, B.: Realtime Perception for Catching a Flying Ball with a Mobile Humanoid, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Shanghai, China, pp. 5955 to 5962, October 2010.
- [Bir11a] Birbach, O., Frese, U.: Estimation and Prediction of Multiple Flying Balls Using Probability Hypothesis Density Filtering, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA, pp. 3426 to 3433, Sept. 2011.
- [Bit76] Bitner, J. R., Erlich, G., Reingold, E. M.: Efficient Generation of the Binary Reflected Gray Code and its Applications, Communications of the Association for Computer Machinery, Vol. 19, No. 9, pp. 517 to 521, September 1976.
- [Bor08] Borko, F.: Encyclopedia of Multimedia, 2nd Edition, Springer Science + Business Media LLC, 1000 pgs, 2008.
- [Bor09] Borst, C., Wimboeck, T., Schmidt, F., Fuchs, M., Brunner, B., Zacharias, F., Giordano, P. R., Konietschke, R., Sepp, W., Fuchs, S., Rink, C., Albu-Schaeffer, A., Hirzinger, G.: Rollin' Justin - Mobile Platform with Variable Base, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, pp. 1597 to 1598, May 2009.
- [Boy87] Boyer, K. L., Kak, A. C.: Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 9, No. 1, pp. 14 to 28, January 1987.
- [Bri59] Briggs, L. J.: Effect of Spin and Speed on Lateral Deflection (Curve) of a Baseball and Magnus Effect for Smooth Spheres, American Journal on Physics, No.27, pp. 589 to 596, March 1959.
- [Cas98] Caspi, D., Kiryari, N.: Range Imaging with Adaptive Color Structured Light, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, No. 5, pp. 470 to 480, May 1998.
- [Cha68] Chapman, S.: Catching a Baseball, American Journal of Physics, Vol. 36, No. 10, pp. 868 to 870, October 1968.
- [Cha80] Chang, C. B.: Ballistic Trajectory Estimation with Angle-only Measurements, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 25, No. 3, pp. 474 to 480, June 1980.

- [Cha00] Chadwick, S. G., Haake, S. J.: The drag coefficient of tennis balls, *Int. Conf. on the Engineering of Sport*, Sydney, Australia, pp. 169 to 176, June 2000.
- [Cha14] Changey, S., Pecheur, E., Brunner, T.: Attitude Estimation of a projectile using Magnetometers and Accelerometers, *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Monterey, USA, pp. 1168 to 1173, May 2014.
- [Che09] Chen, L. M., Chen Y. J.: A study of shuttlecock's trajectory in badminton, *Journal on Sports Science and Medicine*, Vol. 8, pp. 657 to 662, January 2009.
- [Chi79] Chitananda G. K., Krishna G.: The Condensed Nearest Neighbor Rule Using the Concept of Mutual Nearest Neighborhood, *IEEE Transactions on Information Technology*, Vol. 25, No. 4, pp. 488 to 490, July 1979.
- [Chi95] Chiou, R. N., Chen, C. H., Hung, K. C., Lee, J. Y.: The Optimal Camera Geometry and Performance Analysis of a Trinocular Vision System, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 25, No. 8, August 1995.
- [Cho11] Choe, T. E., Rasheed, Z., Taylor, G., Haering, N.: Globally Optimal Target Tracking in Real Time using Max-Flow Network, *IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, Barcelona, Spain, pp. 1855 to 1862, November 2011.
- [Chu03] Chudinov, P. S.: An optimal angle of launching a point mass in a medium with quadratic drag force, *Indian Journal on Physics*, Vol. 77B, pp. 465 to 468, December 2003.
- [Coo96] Cooke, A. J., Shuttlecock design and development, in Haake, S.: *the Engineering of Sport*, Sheffield, Taylor & Francis.
- [Coo00] Cooke, A. J.: An Overview of Tennis Ball Aerodynamics, *Sports Engineering*, No. 3 2000, pp.123 to 129, February 2000.
- [Cov67] Cover, T. M., Hart, P. E.: Nearest Neighbor Pattern Classification, *IEEE Transactions in Information Theory*, Vol. IT-13, pp. 21-27, 1967.
- [Dav49] Davies, J. M.: The Aerodynamics of Golf Balls, *Journal of Applied Physics*, Vol. 20, No. 9, pp. 821 to 829, September 1949.
- [Dav96] Davies, C.J., Nixon, M.S.: Sensing Surface Discontinuities via Coloured Spots, *Int. Workshop on Image and Signal Processing*, Manchester, UK, pp. 573 to 576, November 1996.
- [Fae08] Faes, L., Erla, S., Nollo, G: Quantifying the complexity of short-term heart period variability through k nearest neighbor local linear prediction, *Conf. on Computers in Cardiology*, Bologna, Italia, pp. 549 to 552, September 2008.
- [Far02] Farina, M., Ristic, B., Benvenuti, D.: Tracking a Ballistic Target: Comparison of Several Nonlinear Filters, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 38, No. 3, pp. 854 to 867, July 2002.
- [Fed90] Feddema, J. T., Lee, C. S. G.: Adaptive Image Feature Prediction and Control for Visual Tracking with a Hand-Eye Coordinated Camera, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 20, No. 5, pp. 1172 to 1183, September 1990.
- [Fra06] Frank, H., Wellerdick-Wojtasik, N., Hagebeucker, B., Novak, G., Mahlknecht, S.: Throwing Objects: a bio-inspired Approach for the Transportation of Parts, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, Kunming, China, pp. 91 to 96, December 2006.
- [Fra07] Frank, H., Barteit, D., Wellerdick-Wojtasik, N., Frank, T., Novak, G., Mahlknecht, S.: Autonomous Mechanical Controlled Grippers for Capturing Flying Objects, *IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics*, Vienna, Austria, pp. 431 to 436, June 2006.
- [Fra08] Frank, H.: Design and Simulation of a Numerical Controlled Throwing Device, *Second Asia Int. Conf. on Modeling and Simulation AICMS 08*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 777 to 782, May 2008.
- [Fra08a] Frank, H., Barteit, D., Meyer, M., Mittnacht, A., Novak, G., Mahlknecht, S.: Optimized Control Methods for Capturing Flying Objects with a Cartesian Robot, *IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics*, Chengdu, China, pp. 160-165, 2008.
- [Fra09] Frank, H., Mittnacht, A., Scheiermann, J.: Throwing of Cylinder Shaped Objects, *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, Singapore, pp. 59 to 64, July 2009.
- [Fra10] Frank, T, Schroedter, C., Janoske, U: Holistic Modeling of Trajectories for Cylinder-Shaped Objects, *European Symposium on Computer Modelling and Simulation*, Pisa, Italy, pp. 223 to 228, November 2010.
- [Fra11] Frank, T., Janoske, U., Schroedter, C.: Detection of Position and Orientation of Flying Cylinder Shaped Objects by Distance Sensors, *IEEE Int. Conf. on Mechatronics*, Istanbul, Turkey, pp. 1623 to 1629, April 2011.
- [Fra11a] Frank, H., Frank, T., Mittnacht, A., Sichau, C.: A Bioinspired 2DOF Throwing Robot, *IEEE Africon*, Livingstone, Zambia, pp. 1 to 6, September 2011.
- [Fra12] Frank, T., Janoske, U., Mittnacht, A., Schroedter, C.: Automated Throwing and Capturing of Cylinder-Shaped Objects, *IEEE Int. Conf. on Robotic and Automation*, Saint Paul, Minnesota, USA, pp. 5264 to 5270, May 2012.
- [Fre01] 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 Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Maui, Hawaii, USA, pp. 591 to 596, November 2001.
- [Fuc08] Fuchs, S., Hirzinger, G.: Extrinsic and Depth Calibration of ToF-cameras, *IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, Anorage, USA, pp. 1 to 6, June 2008.
- [Fuj14] Fujimoto, Y., Sugiura, T., Murata, N.: K-Nearest Neighbor Approach for Forecasting Energy Demands Based on Metric Learning, *Int. Work-Confer. on Time Series*, Granada, Spain, pp. 1127 to 1137, June 2014.
- [Fur06] Furukawa, N., Namiki, A., Taku, S., Ishikawa, M.: Dynamic Regrasping Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, USA, pp. 181 to 187, May 2006.
- [Gan10] Ganapathi, V., Plagemann, C., Koller, D., Thrun, S.: Real Time Motion Capture Using a Single Time-Of-Flight Camera, *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, San Francisco, USA, pp. 755 to 762, June 2010.
- [Gar11] Garg, R., Indu, S., Chadhury, S.: Camera and Light Source Placement: A Multi-Objective Approach, *Third National Conf. on Computer Vision, Pattern Recognition, Image Processing and Graphics*, Hubli, India, pp. 187 to 191, December 2011.
- [Gil99] Gillies, M. F. P., Dodgson, N. A.: Ball Catching: An Example of Psychologically based Behavioural Animation, *Eurographics UK 17th Annual Conf.*, Cambridge, UK, pp. 229 to 236, April 1999.
- [Gof09] Goff, J. E., Carre, M. J.: Trajectory analysis of a soccer ball, *American Journal of Physics*, Vol. 77, pp. 1020 to 1027, Nov. 2009.
- [Gof13] Goff, J. E.: A review of recent research into aerodynamics of sport projectiles, *Sports Engineering*, Vol. 2013, No. 4, pp. 137 to 154, April 2013.
- [Guo12] Guo, F., Short-term traffic prediction under normal and incident conditions using singular spectrum analysis and the k-nearest neighbour method, *IET and ITS Conf. on Road Transport Information and Control*, London, UK, pp. 1-6, Sept. 2012.

- [Hal01] Hall-Holt, O., Rusinkiewics, S.: Stripe Boundary Codes for Real-Time Structured-Light Range Scanning of Moving Objects, IEEE Int. Conf. on Computer Vision, Vancouver, Canada, Vol. 2, pp. 359 to 366, July 2001.
- [Her09] Herrejón, R., Kagami, S., Hashimoto, K.: Position Based Visual Serving for Catching a 3-D Flying Object Using RLS Trajectory Estimation from a Monocular Image Sequence, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, Guilin, pp. 665-670, 2009.
- [Hor99] Horn, E. and Hiryati, N.: Toward Optimal Structured Light Patterns, Image and Vision Computing, Vol. 17, No. 2, pp. 87 to 97, February 1999.
- [Hov91] Hove, B., Slotine, J.-J.: Experiments in Robotic Catching, American Control Conf., Boston, USA, pp. 381 to 386, 1991.
- [Hub87] Hubbard, M., Alaways, L. W.: Optimum Release Conditions for the New Rules Javelin, Int. Journal on Sport Biomechanics, Vol. 3, pp. 207 to 221, January 1987.
- [Hub87] Hubbard, M., Bergman, C. D.: Effect of Vibrations on Javelin Lift and Drag, Int. Journal on Sport Biomechanics, Vol. 5, pp. 207 to 221, January 1989.
- [Ima04] Imai, Y., Namiki, A., Hashimoto, K., Ishikawa, M.: Dynamic Active Catching Using a Highspeed Multifingered Hand and a High-speed Vision System, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, New Orleans, USA, pp. 1849 to 1854, 2004.
- [Ish96] Ishii, I., Nakabo, Y., Ishikawa, M.: Target Tracking Algorithm for Ims Visual Feedback System Using Massively Parallel Processing, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 2309 to 2314, 1996.
- [Ita12] Itagaki, Y., Suzuki, A., Iyota, T.: Indoor Positioning for Moving Objects Using a Hardware Device with Spread Spectrum Ultrasonic Waves, Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sydney, Australia, pp. 1 to 6, November 2012.
- [Jaz70] Jazvinski, A. H.: Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic Press, New York, 1970.
- [Jia14] Jia, L., Radke, R. J.: Using Time-of-Flight Measurements for Privacy-Preserving Tracking in a Smart Room, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 1, pp. 689 to 696, February 2014.
- [Jur12] Jurado, F., Palacios, G., Flores, F.: Vision-based Trajectory Tracking on the 3D Virtual Space for a Quadrotor, Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conf., Cuernavaca, Mexico, pp. 31 to 36, November 2012.
- [Kaj99] Kajikawa, S., Saito, M., Ohba, K., Inooka, H.: Analysis of Human Arm Movement for Catching a Moving Object, IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 698 to 703, October 1999.
- [Kal61] Kalman, R. E., Bucy, R. S.: New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, Journal on Fluids Engineering, Vol. 83, pp. 95 to 108, March 1961.
- [Kan12] Kang, H., Park, F. C.: Humanoid Motion Optimization via Nonlinear Dimension Reduction, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA, pp. 1444 to 1449, May 2012.
- [Kao13] Kao, S.-T., Yang, Z.-Y., Hong, M.-T.: Design and Implementation of a Color-Based Visual Tracking Control System, Int. Conf. on Automatic Control, Sun Moon Lake, Taiwan, pp. 371 to 376, December 2013.
- [Kar54] Karman, T. von: Aerodynamics. Selected Topics in the Light of Their Historical Development, Cornell University Press, Ithaca, New York, March 1954.
- [Kho12] Khoshelham, K., Elberink, S. O.: Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications, Sensors, Vol. 12, No. 2, pp. 1437-1454, February 2012.
- [Kim12] Kim, S., Billard, A.: Estimating the non-linear dynamics of free-flying objects, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 60, pp. 1108-1122, June 2012.
- [Kim13] Kim, J., Hung, N. H., Lee, Y., Lee, S.: Structured Light Camera Base 3D Visual Perception and Tracking Application System with Robot Grasping Task, IEEE Int. Symposium on Assembly and Manufacturing, Xian, China, pp. 187 to 192, August 2013.
- [Kim14] Kim, S., Shukla, A., Billard, A.: Catching Objects in Flight, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 30, No. 5, pp. 1049-1065, 2014.
- [Kob11] Kober, J., Peters, J.: Learning Elementary Movements Jointly with a Higher Level Task, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA, pp. 338 to 343, September 2011.
- [Kra05] Kramer, K. A., Stubberud, S. C.: Impact Time and Point Predicted Using a Neural Extended Kalman Filter, Int. Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, Melbourne, Australia, pp. 199 to 204, 2005.
- [Lee02] Lee, J.H., Akiyama, T., Hashimoto, H.: Study on Optimal Camera Arrangement for Positioning People in Intelligent Space, IEEE/RSJ Int. Conf. on intelligent robots and systems, Lausanne, Switzerland, pp. 220 to 225, October 2002.
- [Lin89] Lin, Z., Zeman, V., Patel, R. V.: On-line robot trajectory planning for catching a moving object, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Scottsdale, USA, Vol. 3, pp. 1726 to 1731, May 1989.
- [Liu06] Liu, J., Zhang, Y., Li, Z.: Selection of Cameras Setup Geometry Parameters in Binocular Stereovision, IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics, Bangkok, Thailand, pp. 1 to 6, June 2006.
- [Liu09] Liu, L., Zhang, X., Ma, H.: Dynamic Node Collaboration for Mobile Target Tracking in Wireless Camera Sensor Networks, IEEE Conf. on Computer Communications, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 1188 to 1196, April 2009.
- [Liu10] Liu, L., Zhang, X., Ma, H.: Optimal Node Selection for Target Localization in Wireless Camera Sensor Networks, IEEE Transactions on vehicular technology, Vol. 59, No. 7, pp. 3562 to 3576, September 2010.
- [Luc87] Lucero, E. F., Hagan, J. C., Beyers, M. E.: Subsonic Aerodynamics of Rectangular Parallelepiped Shapes of Fineness Ratio of One-Half, Journal of Spacecrafts and Rockets, Vol. 24, No. 4, pp. 311 to 318, July-August 1987.
- [Meh08] 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.
- [Mir13] Mironov, K. V., Pongratz, M.: Applying neural networks for prediction of flying objects trajectory, Vestnik UGATU, Vol. 17, No. 6(59), pp. 33 to 37, December 2013. EDN PRHELU.
- [Mir14] Mironov, K. V., Pongratz, M., Dietrich, D.: Predicting the Trajectory of a Flying Body Based on Weighted Nearest Neighbors, Int. Work-Conf. on Time Series, Granada, Spain, pp. 699 to 710, June 2014.
- [Mir15] Mironov, K. V., Vladimirova, I. V., Pongratz, M.: Processing and Forecasting the Trajectory of a Thrown Object Measured by the Stereo Vision System, IFAC-PapersOnLine, Vol. 48, No. 11, pp. 28 to 25, June 2015. DOI:10.1016/j.ifacol.2015.09.155.
- [Miy10] Miyashita, H., Yamavaki, T., Yashima, M.: Learning Control Method for Throwing an Object More Accurately with One Degree of Freedom Robot, IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, Montréal, Canada, pp. 397 to 402, 2010.

- [Mor04] Mori, R., Hashimoto, K., Miyazaki, F.: Tracking and Catching of 3D Flying Target based on GAG Strategy, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, New Orleans, USA, pp. 5189 to 5194, April 2004.
- [Mor10] Morsly, Y., Djouadi, M. S., Aouf, N.: On the Best Interceptor Placement for an Optimally Deployed Visual Sensor Network, Istanbul, IEEE Int. Conf. on systems, man and cybernetics, Turkey, pp. 43 to 51, October 2010.
- [Muk94] Mukai, T., Ishikawa, M.: An Active Sensing Method Using Estimated Errors for Multisensor Fusion Systems, IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Las Vegas, USA, pp. 615 to 622, 1994.
- [Nak11] Nakamura, T.: Real-time 3-D Object Tracking Using Kinect Sensor, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, Phuket, Thailand, pp. 784 to 788, December 2011.
- [Nam99] Namiki, A., Nakabo, Y., Ishii, I., Ishikawa, M.: High Speed Grasping Using Visual and Force Feedback, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, USA, pp. 3195 to 3200, May 1999.
- [Nam03a] Namiki, A., Ishikawa, M.: Robotic Catching Using a Direct Mapping from Visual Information to Motor Command, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, Taipei, Taiwan, pp. 2400 to 2405, September 2003.
- [Nam03b] Namiki, A., Imai, Y., Ishikawa, M.: Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching, IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 2666 to 2671, 2003.
- [Nel05] Nelson, E., Pachter, M., Musick, S.: Projectile Launch Point Estimation from Radar Measurements, American Control Conf., Portland, USA, pp. 1275 to 1282, June 2005.
- [Nem11] Nemeč, B., Vuga, R., Ude, A.: Exploiting Previous Experience to Constrain Robot Sensorimotor Learning, IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, Bled, Slovenia, pp. 727 to 732, October 2011.
- [Nis97] Nishiwaki, K., Konno, A., Nagashima, K., Inaba, M., Inoue, H.: The Humanoid Saika that Catches a Thrown Ball, IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, Sendai, Japan, pp. 94 to 99, October 1997.
- [Non10] Nonomura, J., Nakashima, A., Hayakawa, Y.: Analysis of Effects of Rebounds and Aerodynamics for Trajectory of Table Tennis Ball, SICE Annual Conf. 2010, Taipei, Taiwan, August 2010.
- [Noo11] Noonan, P. J., Cootes, T. F., Hallet, W. A., Hinz, R.: The Design and Initial Calibration of an Optical Tracking System Using the Microsoft Kinect, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conf., Valencia, Spain, pp. 3614 to 3617, Oct. 2011.
- [Opr13] Oprisescu, S., Florea, L., Ovreiu, E.: Detection of thrown objects using ToF cameras, IEEE Int. Conf. on Intelligent Computer Communication and Processing, Cluj-Napoca, Romania, pp. 83 to 86, September 2013.
- [Par11] Park, Y., Lepetit, V., Woo, W.: Texture-Less Object Tracking with Online Training using an RGB-D Camera, IEEE Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality, Basel, Switzerland, pp. 121 to 126, October 2010.
- [Pia10] Piatti, D.: Time-of-Flight cameras: tests, calibration and multi-frame registration for automatic 3D object reconstruction, PhD thesis, Doctoral school of Environment and Territory, Polytechnic University of Turin, December 2010.
- [Pon09] Pongratz, M.: Object Touchdown Position Prediction, Diploma Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Vienna University of Technology, September 2009.
- [Pon10] Pongratz, M., Kupzog, F., Frank, H., Barteit, D.: Transport by Throwing - a bio-inspired Approach, IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics, Osaka, Japan, pp. 685 to 689, July 2010.
- [Pon11] Pongratz, M., Pollhammer, K., Szep, A.: KOROS Initiative: Automatized Throwing and Catching for Material Transportation, ISoLA 2011 Workshops, pp. 136 to 143, 2012.
- [Pon13] 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. EDN RKNTJV.
- [Pon15] Pongratz, M., Mironov, K. V.: Accuracy of Positioning Spherical Objects with Stereo Camera System, IEEE Int. Conf. on Industrial Technology, Seville, Spain, pp. 1608 to 1612, March 2015. DOI:10.1109/ICIT.2015.7125326.
- [Pos09] Post, S. L., McLachlan, J., Lonas, T., Dancs, J., Knobloch, D., Darrow, C., Sinn, E., Davis, S., Neilly, D., Funk, A., Golz, J., Phelps, A., Goers, B.: Aerodynamics of Badminton Shuttlecock, ASME Int. Mechanical Engineering Congress & Exposition, Lake Buena Vista, USA, pp. 1 to 6, November 2009.
- [Pro96] Proesmans, M., Van Gool, L., Oosterlinck, A.: One-Shot Active 3D Shape Acquisition, Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, Vienna, Austria, Vol. 3, pp. 336 to 340, August 1996.
- [Qin13] Qin, Y. F., Zhong, H.: Research on Basketball Flight Simulation Based on the Video Data Analysis Technology, Applied Mechanics and Materials, Vol. 380 to 384, pp. 1851 to 1855, August 2013.
- [Rav10] Ravindra, V. C., Bar-Shalom, Y., Willett, P.: Projectile Identification and Impact Point Prediction, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 46, No. 4, pp. 2004 to 2021, October 2010.
- [Rib09] Ribnick, E., Atev, S., Papanikolopoulos, N.P.: Estimating 3D Positions and Velocities of Projectiles from Monocular Views, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 31, No. 5, pp. 938 to 944, May 2009.
- [Ril02] Riley, M., Atkeson, C. G.: Robot Catching: Towards Engaging Human-Humanoid Interaction, Autonomous robots, Vol. 12, No. 1, pp. 119 to 128, January 2002.
- [Ris03] Ristic, B., Farina, A., Benvenuti, D., Arulampalam, M. S.: Performance bounds and comparison of nonlinear filters for tracking a ballistic object on re-entry, IEE Proceedings on Radar and Sonar Navigation, Vol. 150, No. 3, pp. 65 to 70, April 2003.
- [Sca05] Scaramuzza, D., Pagnotelli, S., Valligi, P.: Ball Detection and Predictive Ball Following Based on a Stereoscopic Vision System, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, pp. 1573-1578, April 2005.
- [Sej87] Sejnovsky T. J., Rosenberg C. R.: Parallel networks that learn to pronounce English text, Complex systems, Vol. 1987, No. 1, pp.145 to 168, January 1987.
- [Sen04] Senoo, T., Namiki, A., Ishikawa, M.: High-speed Batting Using a Multi-Jointed Manipulator, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, New Orleans, USA, pp. 1191 to 1196, April 2004.
- [She09] Shen, Q., He, X.: GPS Positioning-based Trajectory Parameter Estimation and Ejection Point Self-Adapting Control Method, Second Int. Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling, Wuhan, China, pp. 194 to 197, December 2009.
- [Shi05] Shiokata, D., Namiki, A., Ishikawa, M.: Robot Dribbling Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent robots and Systems, Edmonton, Canada, pp. 2097 to 2102, 2005.

- [Sir12] Siradjuddin, I., Behera, L., McGinnity, T. M., Coleman, S.: A position based visual tracking system for a 7 DOF robot manipulator using a Kinect camera, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Brisbane, Australia, pp. 1 to 7, June 2012.
- [Smi07] Smith, C., Christensen, H. I.: Using COTS to Construct a High Performance Robot Arm, Int. Conf. on Robotics and Automation, Roma, Italy, pp. 4056 to 4063, April 2007.
- [Spr91] Sproull, R. F.: Refinements to Nearest Neighbor Searching in k-Dimensional Trees, Algorithmica, Vol. 6, No. 1-6, pp. 579 to 589, June 1991.
- [Ste88] Stepanek, A., The aerodynamics of tennis balls – the topspin lob, American Journal of physics, No. 56, pp.138 to 142, 1988.
- [Suk12] Sukhan, I., Kyeongdae, Y., Jaewoong, K., Moonju, L.: Surface Patch Primitive Based Object Modeling from CAD Data, Applied Mechanics and Materials, vol. 162, pp. 179-183, March 2012.
- [Swa08] Swadzba, A., Beuter, N., Schmidt, J., Sagerer, G.: Tracking Objects in 6D for Reconstructing Static Scenes, IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Anorage, USA, pp. 1 to 7, June 2008.
- [Wan08] Wang, S., Kim, H., Lin, C.-S., Chen, H.: A Robust Depth Measurement Method with Optimal Trace Tracking of Structured Light Using Dynamic Programming, IEEE Int. Conf. on Industrial Technology, Chengdu, China, pp. 1 to 5, April 2008.
- [Wat87] Watts, R. G., Ferrer, R.: The Lateral Force on a spinning sphere: Aerodynamics of a Curveball, American Journal of physics, No. 55, pp. 40 to 43, January 1987.
- [Wei80] Weinstein, E., Levanon, N.: Passive Array Tracking of a Continuous Wave Transmitting Projectile, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 16, No. 5, pp. 721 to 726, September 1980.
- [Win12] Winkler, V., Edrich, M., Ziegler, H. W.: Ka-Band FMCW-Radar for Sniper Detection, Int. Radar Symposium, Warsaw, Poland, pp. 201 to 204, May 2012.
- [Yak87] Yakowitz, S.: Nearest-Neighbour Methods for time series analysis, J. Time Series Analyses, Vol. 8, No. 2, pp. 235-247, 1987.
- [Yao08] Yao, J., Wang, X., Gao, Y., Wang, Y.: A Method of Identifying Rocket Trajectory Parameters Based on Generalized Kalman Attenuating Memory Algorithm, IEEE Conf. Industrial Electronics and Applications, Singapore, pp. 1204 to 1206, June 2008.
- [Yua12] Yuan, T., Bar-Shalom, Y., Wilett, P., Mozeson, E., Pollak, S., Hardiman, D.: A Multiple IMM Estimation Approach with Unbiased Mixing for Thrusting Projectiles, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 48, No. 4, pp. 3250 to 3267, October 2012.
- [Yua14] Yuan, T., Bar-Shalom, Y., Wilett, P., Hardiman, D.: Impact Point Prediction for Thrusting Projectiles in the Presence of Wind, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 50, No. 1, pp. 102 to 119, January 2014.
- [Zar00] Zarchan, P.: Tracking and Intercepting Spiraling Ballistic Missiles, Position Location and Navigation Symposium, San Diego, USA, pp. 277 to 284, March 2000.
- [Zha00] Zhang, Z.: A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, pp. 1330 to 1334, November 2000.
- [Zha12] Zhang, Y., Luo, J., Hauser, K.: Sampling-based Motion Planning with Dynamic Intermediate State Objectives: Application to Throwing, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Saint Paul, Minnesota, USA, pp. 2551 to 2556, May 2012.
- [Zho07] Zhou, D.-Q.: Study of Key Techniques Applied in Radars of Locating Enemy Artillery, Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology, Bullin, China, pp. 1 to 4, April 2007.

*Поступила в редакцию 28 апреля 2024 г.*

#### МЕТАДАННЫЕ / METADATA

**Title:** Transport-by-Throwing — a robotic method of moving objects by through: overview of the methods used.

**Abstract:** Throw-and-drop handling of objects is a promising method of robotic transportation of parts in flexible manufacturing systems. This review analyzes the known methods used to implement this approach. In terms of the aerodynamics of ballistic motion, general information is provided, relevant issues of weapon ballistics and aircraft aerodynamics are considered, and the results of studying the aerodynamics of sports balls and similar objects are included. Approaches to statistical evaluation of ballistic curves are reviewed. The results in the field of visual tracking of moving objects are considered: motion capture using sensors attached to the object; use of structured light and time-of-flight sensors; monocular vision; stereovision. Approaches to robotic grasping and transportation by throwing are discussed: throw and grasp; transportation by throw; comparison of approaches. The issues of trajectory prediction in this problem are considered: grasp without prediction; forecasting using physical models, using a neural network; using the nearest neighbor algorithm.

**Key words:** robotic system; statistical evaluation of ballistic curves; tracking of moving objects; nearest neighbor algorithm.

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

#### Об авторе / About the author:

##### МИРОНОВ Константин Валерьевич

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)