

УДК 528.854

## СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕМ РОБОТОМ-ВОДИТЕЛЕМ

П.С. Сорокоумов (*petr.sorokoumov@gmail.com*)  
НИЦ "Курчатовский институт", Москва

**Аннотация.** В данной работе описывается метод распознавания рулевого колеса и рычага переключения передач автомобиля, предназначенный для использования антропоморфным роботом-водителем. Разработанный алгоритм позволяет корректно обрабатывать значительные перепады яркости изображения и не требует изменения конструкции автомобиля. Полученный программный комплекс в первую очередь предназначен для разработки биоподобных методов управления движениями антропоморфных роботов, но может быть в дальнейшем использован как самостоятельный компонент систем компьютерного зрения.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, биоподобие, робот-водитель

### Введение

Применение антропоморфных роботов на практике существенно осложнено тем, что многие привычные для человека задачи, например координация сложных движений, решаются ими недостаточно качественно. Для проведения исследований по управлению движением конечностей на примере действий водителя оказалось необходимым реализовать вспомогательную систему компьютерного зрения, способную определять по данным с видеокамеры робота органы управления автомобилем и рассчитывать их положение относительно робота. Полученная система может быть использована для распознавания органов управления этих или схожих типов в других задачах, требующих автоматизации производственных процессов.

### 1. Постановка задачи

Биоподобие – один из главных источников новых идей в области робототехники; например, сами понятия об интеллекте, интеллектуальном агенте возникли во многом за счёт обобщения характерных свойств

биологических систем. Среди других заимствованных из биологии концепций – построение роботов, строение тело которых аналогично животным, в том числе человеку. Однако системы управления движениями этих роботов не всегда решают свою задачу качественно [Pfeifer, 2012]; одними из самых сложных задач были и остаются те, которые взрослый человек выполняет без труда – движение по пересечённой местности, посадка в автомобиль, манипуляции предметами обстановки ([Ackerman,2015], [Atkeson, 2015]).

Для того чтобы улучшить работу систем управления роботами в таких условиях, желательно поставить перед андроидом просто сформулированную, но плохо решаемую на текущий момент задачу. Например, можно попытаться воспроизвести работу человека-водителя с органами управления автомобилем.

Такая постановка задачи имеет несколько преимуществ перед, например, движениями по пересечённой местности или по лестнице: робот находится в сидячем положении, поэтому поддерживать равновесие ему не нужно; робот движется в ограниченном пространстве, которое легко наблюдается; возможно сравнение движения рук робота и человека-водителя при выполнении схожих задач. Для исследований в этой области в лаборатории робототехники НИЦ "Курчатовский институт" был создан экспериментальный стенд, показанный на рис. 1. Из органов управления на стенде имеются рулевое колесо, рычаг переключения передач и педаль; все элементы управления сделаны легкоподвижными, чтобы снизить риск повреждений робота.



Рис. 1. Общий вид робота Reem-C [Reem-C] за экспериментальным стендом

Для того чтобы робот смог манипулировать органами управления автомобилем, он должен сначала определить их положение в пространстве. Разумно будет построить для этого систему компьютерного зрения; при этом полученное решение можно будет применять не только для лабораторных исследований на конкретном роботе, но и для более широкого круга задач. Крайне желательно не вносить изменений в конструкцию органов управления, потому что иначе система может снизить надёжность органов управления и потребует для развёртывания в новых условиях, например, в реальном автомобиле, слишком больших усилий. Готовых универсальных решений для этой задачи распознавания в настоящий момент нет.

Далее в данной работе описаны основные решения, применённые при создании системы распознавания органов управления. По результатам обзора готовых средств и методов, решающих аналогичные проблемы, были определены наиболее перспективные пути построения системы в условиях данной задачи. Далее были построены описания рулевого колеса и рычага, достаточные для их успешной локализации. Разработанные модели были реализованы в виде модулей системы ROS и протестированы на видеоданных, полученных от камер тестового робота. Полученное решение оказалось пригодным для использования в проводимых в настоящий момент экспериментах.

## **2. Выбор компонентов алгоритма распознавания**

Автоматическое распознавание элементов управления автомобилем – задача весьма трудная. Прежде всего, внешний вид и геометрия руля и рычага переключения передач сильно отличается в разных моделях; зачастую водители меняют их вид ещё и самостоятельно, используя чехлы, оплётки и т.п. Форма рулевого колеса, кроме того, может быть не круглой, но на практике подобное встречается достаточно редко и главным образом в специализированных спортивных автомобилях, так что в дальнейшем такая возможность не рассматривается. Салон автомобиля, то есть фон, на котором располагаются органы управления, может ещё больше отличаться от модели к модели, и модифицируется он чаще. Это означает, что система распознавания должна учитывать особенности конкретно используемой машины при составлении модели элемента управления.

Ещё один важный фактор сложности задачи – то, что внешний вид органов управления зависит от окружающей обстановки, прежде всего от освещения. При движении яркость освещения часто крайне нестабильна, полосы тени и света от сменяют друг друга с высокой скоростью. При этом многие значимые источники света движутся относительно автомобиля с большой скоростью (фары встречных машин, фонари). В ночных условиях,

особенно при выключенном освещении салона, даже человеку сложно распознать рулевое колесо и рычаг переключения передач визуально. Поэтому в разрабатываемом распознавателе необходимо использовать как один из признаков некоторую величину, которая слабо меняется при колебаниях освещённости. Крайне желательно также, чтобы использованный метод допускал работу в тёмное время суток.

Внешний вид руля и рычага меняется также в зависимости от положения рук водителя на них. Водитель-человек при этом способен благодаря осязанию чувствовать контакт с элементами управления, то же самое может и водитель-робот при наличии тактильных сенсоров.

Наконец, значительные конструктивные переделки тестового автомобиля крайне нежелательны. Разрабатываемое решение должно работать с внесением только минимальных быстрых обратимых изменений в салон; глубокое переоборудование не соответствует постановке задачи.

Исходя из изложенных особенностей задачи, можно обосновать выбор алгоритма для её решения.

- можно применить геометрические параметры салона для поиска органов управления на видеопотоке. Но, во-первых, положение робота при работе может изменяться от тряски, и проконтролировать эти перемещения сложно; во-вторых, достаточно полное трёхмерное моделирование салона и расчёт положения в нём робота весьма трудоёмки и времязатратны, что противоречит требованию быстрого развёртывания.

- для нахождения элементов управления можно было бы использовать цветовые и/или текстурные характеристики их поверхностей; решить эту задачу позволяют многочисленные известные алгоритмы сегментации через кластеризацию. Однако с помощью цветовых характеристик трудно учесть беспорядочные перепады яркости, характерные для условий задачи, а текстурные признаки более устойчивы к колебаниям освещённости, но гораздо менее специфичны: текстуры поверхностей у деталей одного салона часто совпадают. Поэтому применить данные алгоритмы как составные части распознавателя можно, но полагаться исключительно на них опасно; желательно организовать проверку данных.

- для удержания захваченных органов управления можно применить в сочетании с визуальной тактильной информацией сенсоров робота при их наличии; при этом для одних органов управления (например, рычага) эти виды информации должны полностью заменять друг друга, для других (например, руля) – дополнять.

Как видно, все рассмотренные подходы обладают значительными недостатками применительно к рассматриваемым условиям. Однако можно решить поставленную задачу, если разместить хорошо различимые для системы визуального распознавания метки на элементах управления. Так

как метки должны размещаться и убираться достаточно быстро, не требовать квалифицированного обслуживания и точной установки, то наиболее простым вариантом таких меток являются бумажные наклейки. Для того чтобы их можно было уверенно различать при колебаниях освещённости, на наклейки нанесена текстура в виде полос или клеток с шагом, допустимые размеры которого определяются угловым разрешением видеокamеры робота.

### **3. Алгоритм распознавания органов управления**

Для распознавания текстурных меток на руле целесообразно использовать распространённый детектор Лоу (Law). Данный алгоритм для каждой точки получает серию величин, измеряющих распределение энергии двумерного сигнала-изображения по пространственным частотам. Вычисление проводится путём обработки предварительно сглаженного изображения серией линейных фильтров с подобранными частотными характеристиками. Полученные величины (в данном случае использовался вариант с 9 мерами [Ertuğrul, 2014]) служат признаками для дальнейшей классификации. В качестве классификатора точек были испробованы различные алгоритмы, но в конечном счёте оказалось достаточно использовать нормальный байесовский классификатор, обученный на случайно сгенерированной выборке точек из размеченной вручную последовательности кадров.

Полученные в результате обработки данные были использованы сначала для поиска меток на изображении. При этом предполагается, что на этом этапе метки достаточно хорошо видны и руки робота не загораживают никакую часть руля. Метки ищутся в виде сплошных областей, которые содержат текстуру метки по результатам работы классификатора; эти области формируются в явном виде после порогового преобразования и применения морфологической операции эрозии.

Положение руля в пространстве можно оценить, если камера, которая проводит съёмку, откалибрована, то есть допускает вычисление в системе координат камеры положения луча, проходящего через оптический центр камеры и заданную точку изображения с неё. В используемом роботе калибровка камеры производится встроенными средствами его операционной системы; при необходимости можно было бы проделать эту операцию и самостоятельно с помощью калибровочных шаблонов с известными параметрами. В текущей версии алгоритма для минимизации объёма вычислений используется только одна из двух головных камер робота.

При размещении меток на руле необходимо измерить попарные расстояния между ними. Тогда метки и центр камеры образуют

треугольную пирамиду, причём в ней известны 3 угла, прилегающие к вершине-оптическому центру, и 3 ребра, лежащие против каждого из углов. Для определения положения камеры необходимо определить длины неизвестных рёбер пирамиды. Решив данную задачу, мы получаем текущее положение рулевого колеса относительно головы робота; при наличии данных о положении его суставов и о геометрии робота можно определить и глобальные координаты руля.

Начальное положение рычага по данным одной камеры и без знания его размеров найти однозначно невозможно, но можно, действуя аналогично прошлому случаю, найти луч, на котором лежит рычаг. В дальнейшем манипулятор робота должен быть выведен на траекторию, соответствующую этому лучу.

Изложенные действия позволяют найти положение рулевого колеса, если ни одна из меток не заслонена рукой, и все они хорошо распознаны. Однако этого совершенно недостаточно для обеспечения устойчивой работы алгоритма в практически важных случаях. На рис. 2 справа приведён пример изображения, когда руль при быстром повороте заслоняется рукой экспериментатора, причём метки при данной частоте работы камеры не могут быть выявлены текстурным анализом. Для того, чтобы суметь при этом распознать рулевое колесо, необходимо дополнить алгоритм следящим компонентом.



Рис. 2. Примеры изображения руля с метками в разных ситуациях

Для слежения за рулём, независимого от текстурных меток, необходимо сравнивать имеющихся в текущий момент данные с полученными ранее в лучших условиях сведениями о внешнем виде руля. В качестве признака, определяющего руль, было решено использовать интегральное распределение яркости в кольцевой области, занимаемой на изображении рулевым колесом. Общая схема алгоритма поиска руля приведена на рис. 3.

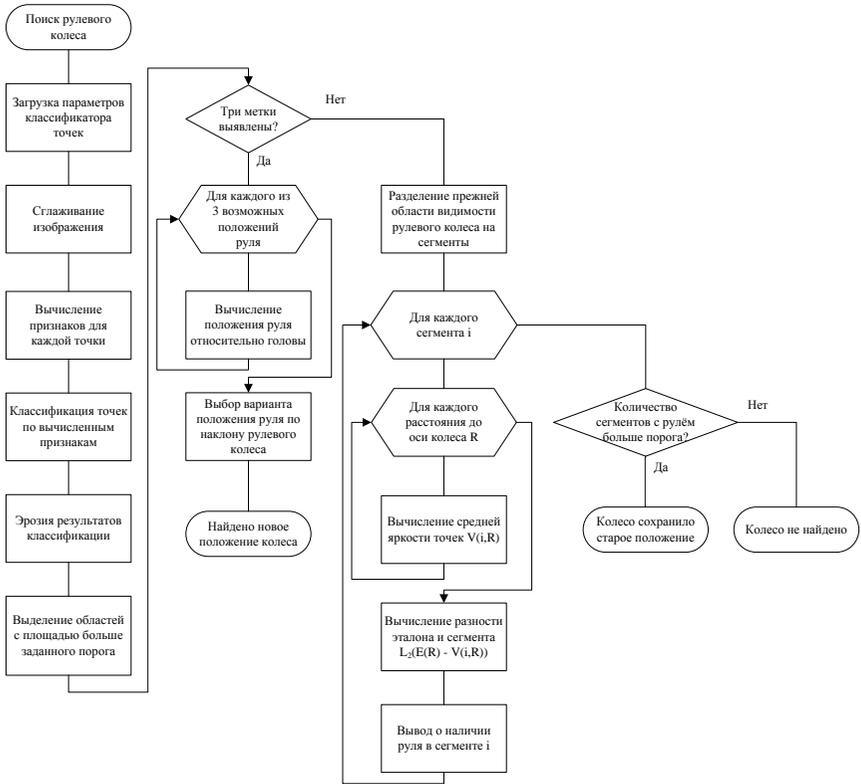


Рис. 3. Схема алгоритма поиска руля на изображении

Эталон яркости формируется при первом распознавании руля. В дальнейшем при потере видимости хотя бы одной из меток яркость области, в которой руль наблюдался в последний раз, сравнивается с эталоном. Для вычисления результатов такого сравнения кольцевая область поиска руля делится на сектора (рис. 4), и по каждому из них отдельно вычисляется разность эталона  $E$  и наблюдаемой яркости  $V$ . Если эта величина превосходит заданный порог  $D$ , считается, что в данной части кольца руль не виден. Далее производится голосование отдельных элементов кольца с задаваемым порогом принятия утверждения о том, что руль наблюдается в проверяемом месте. В случае, если результат голосования отрицателен, считается, что руль потерян из зоны видимости.

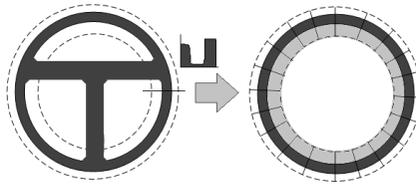


Рис.4. Формирование эталона яркости для слежения за рулём

#### 4. Экспериментальная проверка работы системы

Реализация алгоритма распознавания была выполнена в виде модуля ROS с применением языков программирования Python и C++. Работа с изображениями и видеоданными осуществлялась с применением библиотеки OpenCV. Примеры результатов работы распознавателя руля в разных ситуациях приведены на рис.5.

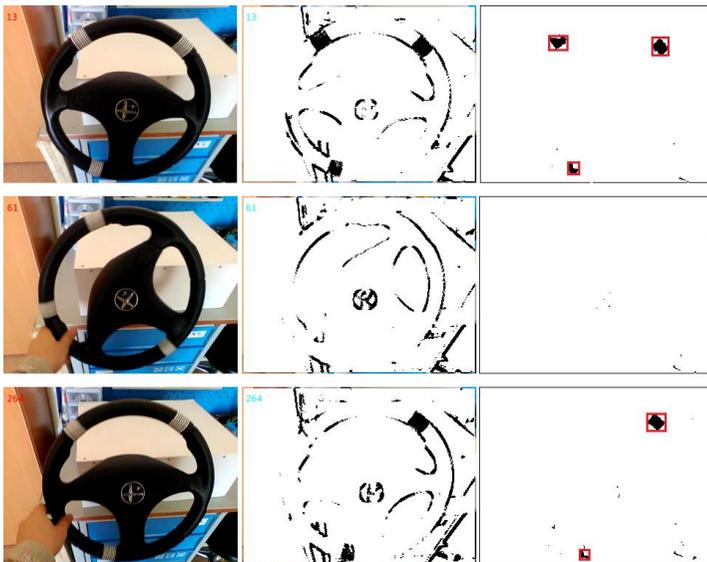


Рис. 5. Примеры результатов работы алгоритма распознавания текстур. Для трёх разных кадров показаны: необработанные данные с камеры (слева); результат классификации точек, где чёрным цветом обозначены точки, распознанные как точки меток (в центре); результат поиска меток после преобразования эрозии (справа)

Видно, что на верхнем кадре успешно распознаны все три метки. На среднем (при быстром вращении руля) и нижнем (при медленном

вращении) изображениях распознано меньше трёх меток, и следящая система в этих случаях сохраняет прежнее положение рулевого колеса. Для обучения классификатора текстур использована размеченная тестовая видеозапись (430 кадров, 20 000 примеров, текстуры в виде чёрных полос либо клеток на белом фоне). Доля успешно распознанных байесовским классификатором точек меток составила 84%. Как видно на рис. 5, имели место многочисленные ложные срабатывания классификатора вне меток на границах однородных областей изображений, что потребовало применения операции эрозии к результатам классификации.

Для проверки точности определения положения рулевого колеса была проведена запись его плавного вращения на жёстко закреплённую в известном, относительно колеса, положении видекамеру (расстояние до центра передней поверхности колеса 30 см, камера направлена на центр колеса, угол наклона камеры и оси колеса одинаков). Далее для каждого кадра была определена линейная ошибка вычисленного положения центра колеса в направлении съёмки и в перпендикулярном ему направлении. Итоговые результаты для 100 проанализированных кадров приведены на рис.6. Из результатов эксперимента можно сделать вывод, что ошибка определения положения рулевого колеса в благоприятных условиях не превышает 2.5 см; это позволяет использовать систему для антропоморфных роботов в натуральную человеческую величину.

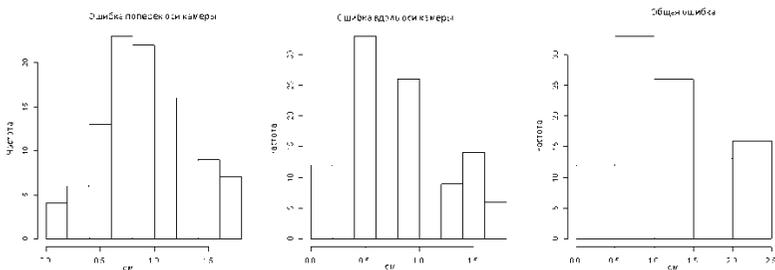


Рис. 6. Ошибки определения положения рулевого колеса

Для проверки следящего алгоритма проведено тестирование на 3 сериях по 20 последовательных изображений руля, получаемых сдвигом полных изображений за границу кадра с заполнением пустого пространства равномерным серым цветом. При этом во всех изображениях после первого одна из меток была закраснена цветом руля. В каждом случае фиксировался кадр, начиная с которого руль не будет распознан. Для всех серий видимая доля руля, при которой он считался распознанным, совпала с порогом принятия решения нечёткой системой.

Свойства полученного алгоритма позволяют использовать его на учебной модели антропоморфного робота лаборатории, предназначенной для проектной деятельности школьников в области мобильной робототехники [Сорокоумов, 2017].

## Заключение

Результатом разработки стала система компьютерного зрения, позволяющая антропоморфному роботу определять на видеопотоке органы управления автомобилем. Данная разработка будет использована для проведения экспериментов по моделированию системы управления движением конечностей человека, но может быть применена и для более общих задач, требующих распознавать объекты в условиях переменной освещённости.

## Список литературы

- [Ackerman,2015] Ackerman E., Guizzo E. DARPA Robotics Challenge: Amazing Moments, Lessons Learned, and What's Next. IEEE Spectrum, June 11, 2015. // Электронный ресурс: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/darpa-robotics-challenge-amazing-moments-lessons-learned-whats-next>
- [Atkeson, 2015] Atkeson C. G., Babu B.P.W., Banerjee N. et al. No falls, no resets: Reliable humanoid behavior in the DARPA robotics challenge. IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2015. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2015.7363436
- [Herault, 2010] Herault J. Vision: Images, Signals and Neural Networks-Models of Neural Processing in Visual Perception. WorldScientific, 2010.
- [Ertuğrul, 2014] Ömer Faruk Ertuğrul. Adaptive texture energy measure method. International Journal of Intelligent Information System, 2014, no 3(2), pp. 13-18.
- [Pfeifer, 2012] Pfeifer R., Lungarella M., Iida F. The Challenges Ahead for Bio-inspired 'Soft' Robotics. Communications of the ACM, November 2012, vol. 55, no. 11. DOI:10.1145/2366316.2366335
- [Rosenzweig, 2015] Rosenzweig J., Bartl M. A Review and Analysis of Literature on Autonomous Driving. The Making of Innovation, October 2015 // Электронный ресурс: [http://www.michaelbartl.com/co-creation/wp-content/uploads/Lit-Review-AD\\_MoI.pdf](http://www.michaelbartl.com/co-creation/wp-content/uploads/Lit-Review-AD_MoI.pdf)
- [Reem-C] REEM-C: робототехнические исследования // Электронный ресурс: <http://pal-robotics.com/ru/products/reem-c/>
- [Shapiro, 2001] Shapiro L., Stockman G. Computer Vision. Prentice-Hall, 2001.
- [Сорокоумов, 2017] Сорокоумов П.С. Учебный проект робота, управляющего автомобилем. Открытое образование. 2017;(2):4-13. DOI:10.21686/1818-4243-2017-2-4-13