

ПРЕПРИНТ

Разработка системы управления БПЛА на основе технического зрения.

Development of a UAV Control System Based on Machine Vision.

Автор: Шарафутдинов Айрат Альбертович, учебное заведение: Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева

Аннотация (Abstract)

Проблема: Управление беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) для точного и безопасного сопровождения движущихся объектов, таких как человек, в динамичной среде является сложной задачей. Существующие решения часто требуют сложной сенсорной аппаратуры (лидары, дальномеры) или демонстрируют недостаточную надежность при изменении условий освещения и фона.

Цель: Разработать и реализовать систему управления квадрокоптером, которая с помощью единственной бортовой камеры обеспечивает детектирование лица человека, оценку расстояния до него на основе анализа размера детектируемой области (в пикселях) и автономное слежение с поддержанием заданной дистанции (~1 метр).

Методы: Использовался алгоритм детектирования лиц Haar cascades для определения местоположения лица в кадре. Расстояние до объекта оценивалось по эмпирической зависимости между количеством пикселей в ограничивающем прямоугольнике и фактической дистанцией, полученной в ходе калибровки. На основе ошибок по положению лица в кадре и по расстоянию формировались управляющие сигналы для полетного контроллера квадрокоптера (через MAVLink/ROS).

Результаты: Разработанный прототип системы успешно детектирует лицо оператора в режиме реального времени, вычисляет расстояние и генерирует команды для движения квадрокоптера вперед/назад и вращения по рысканию (yaw) для удержания лица в центре кадра на заданной

дистанции. Проведенные испытания подтверждают работоспособность концепции.

Ключевые слова: БПЛА, квадрокоптер, техническое зрение, слежение за лицом, оценка расстояния, одометрия по камере, автономное управление.

1. Введение

Актуальность работы обусловлена растущим применением БПЛА в задачах персональной съемки, наблюдения и взаимодействия с человеком. Создание интуитивных систем, где квадрокоптер autonomously сопровождает оператора, представляет значительный практический интерес. Использование исключительно бортовой камеры для решения задач навигации и слежения является экономически эффективным и минимизирует вес аппарата. Данная работа фокусируется на интеграции алгоритмов компьютерного зрения в контур управления БПЛА для создания компактной системы «следящий дрон».

2. Математическая модель и Методология

2.1. Алгоритм детектирования и отслеживания лица

Для локализации лица в видеопотоке был выбран алгоритм каскада Хаара.

2.2. Модель оценки расстояния на основе пиксельной метрики

Ключевая гипотеза: существует обратно пропорциональная зависимость между линейным размером лица в метрах и его размером в пикселях. В ходе калибровки была получена эмпирическая формула: Расстояние $D = (K * \text{Ширина_лица_реальная}) / (\text{Ширина_bbox_в_пикселях})$, где K – калибровочный коэффициент, учитывающий фокусное расстояние камеры и разрешение. Система стремится поддерживать ширину bbox, соответствующую расстоянию $D \approx 1$ м.

2.3. Система управления

Ошибка по положению (смещение лица от центра кадра по осям X, Y) преобразуется в управляющие скорости по тангажу (pitch) и рысканию (yaw).

Ошибка по расстоянию (разница между текущей и целевой шириной bbox) преобразуется в скорость по крену (roll) для движения вперед/назад. Для стабилизации работы использованы ПИД-регуляторы.

3. Экспериментальная реализация

Стенд включает:

1. **БПЛА:** Квадрокоптер с полетным контроллером Pixhawk, поддерживающий внешнее управление по MAVLink.
2. **Система зрения:** Одноплатный компьютер Raspberry Pi 4 с камерой HQ.
3. **Программное обеспечение:** Python, библиотеки OpenCV (для детекции/трекинга), фреймворк DroneKit (для связи с автопилотом).
4. **Безопасность:** Все испытания проводились в ограниченном пространстве с защитной сеткой.

4. Результаты и Обсуждение

В ходе экспериментов подтверждена работоспособность системы.

Основные наблюдаемые характеристики:

- **Точность детекции:** >90% в условиях умеренного освещения и не сложного фона.
- **Стабильность слежения:** Система способна удерживать лицо в кадре при медленном перемещении оператора.
- **Поддержание дистанции:** Квадрокоптер успешно регулирует расстояние, стремясь удерживать расчетное значение ~1 метр. Выявленные ограничения: чувствительность к резким изменениям освещения, необходимость начальной калибровки под конкретного человека, зависимость точности оценки расстояния от фронтальности лица.

5. Заключение

Разработана и апробирована система управления БПЛА, использующая техническое зрение для слежения за лицом человека с регулировкой

дистанции. Доказана принципиальная возможность использования простой пиксельной метрики для оценки расстояния в подобных задачах.

6. Список литературы

1. Viola, P., Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. (Базовый алгоритм детектирования лиц Haar cascades).
2. Zhang, K., Zhang, Z., Li, Z., Qiao, Y. (2016). Joint Face Detection and Alignment using Multi-task Cascaded Convolutional Networks. *IEEE Signal Processing Letters*. (Современный алгоритм MTCNN).
3. Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*. (Описание основной использованной библиотеки компьютерного зрения).
4. Meier, L., Honegger, D., Pollefey, M. (2015). PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. (О полетном контроллере и протоколе связи).
5. Thrun, S., Burgard, W., Fox, D. (2005). *Probabilistic Robotics*. MIT Press. (Фундаментальные основы навигации и оценки состояния в робототехнике, включая сенсорную фильтрацию).