

Разработка автопилота квадрокоптера с применением SDRE-метода

Рассматриваемый доклад посвящен алгоритмам автоматического управления беспилотными летательными аппаратами. Автор задается целью представить новый подход к решению некоторых задач, возникающих при разработке такого рода автопилотов, который, вероятно, должен повысить их качество.

В первой части доклада формулируется базовая математическая модель летательного аппарата и действующих на него сил. Во всем дальнейшем изложении подразумевается отсутствие внешних воздействий (таких как, например, ветер). Автор рассматривает два основных способа описания изменения положения тела в пространстве, принятых в рассматриваемой области — углы Эйлера и кватернионы. Первый из этих подходов предлагает описывать вращение тела через три угла, характеризующих повороты вокруг осей заданной системы координат. Среди преимуществ данного подхода докладчик указывает минимальность набора используемых параметров (3 угла) и простоту понимания и интерпретации такого представления. В качестве недостатков автор указывает наличие множества «альтернативных представлений», сложность в нахождении конечного вращения и подверженность проблеме шарнирного замка (*gimbal lock problem*). Последнее является, пожалуй, самым серьезным недостатком углов Эйлера. Под проблемой множественности представлений, по-видимому, понимается возможность неоднозначности выбора последовательности поворотов. В силу некоммутативности этих операций, различная последовательность их применения, вообще говоря, может привести в различные же положения тела. Именно по этой причине при описании вращения через углы Эйлера принят (при фиксированном выборе осей) строго определенный порядок поворотов. В этом смысле необходимость строгости сложно считать недостатком.

Описывая понятие кватерниона, автор также указывает некоторые достоинства и недостатки этой системы. В качестве преимуществ автор совершенно справедливо указывает скорость вычислений и отсутствие проблемы *gimbal lock*. Было бы уместно также упомянуть о наличии всевозможных интерполяций. Указанные недостатки — неоптимальность представления по количеству используемых параметров и его неочевидность с точки зрения интерпретации — в точности противопоставлены преимуществам углов Эйлера.

Основываясь на приведенном анализе и личных предпочтениях автор делает выбор в пользу кватернионов и представляет модель вращения летательного аппарата с 4 винтами, строится соответствующая система дифференциальных уравнений. Система нелинейна, а потому не получится построить линейное управление. Докладчик описывает несколько современных подходов: PID, MRAC, LQR, SDC. В случае LQR вводится квадратичный функционал качества и рассматривается линеаризация исходной системы. Оптимальное управление при этом строится аналитически. Автор отмечает, что при линеаризации теряется информация о нелинейной составляющей динамики процесса, которая может играть весьма существенную роль. Рассматриваемый далее подход SDC предлагает дискретизировать время и вычислять управление в каждой дискрете на основе текущего состояния, при этом в текущий момент используются уже вычисленные до этого коэффициенты управления. Рассматривая этот подход, автор вводит квадратичный функционал качества и выводит управление с

использованием решения уравнения Риккати, зависящего от состояния. Возникает проблема, связанная с необходимостью постоянного решения уравнений Риккати, что в режиме реального времени является затруднительным для систем с большой размерностью в условиях строгих ограничений по времени и ресурсам микроконтроллера. В качестве альтернативного варианта докладчик предлагает использовать память — заранее решить уравнение во всех возможных точках. Сам этот подход, как указывается в докладе, становится возможным при введении адекватных ограничений (и с учетом естественных): ограниченность компонент кватерниона, разумные ограничения на угловые скорости (при слишком больших скоростях уже бессмысленно пытаться чем-то управлять), вполне определенная точность вычислителя и прочие. С учетом представленных ограничений, предполагает автор, возможно разместить в памяти всевозможные заранее вычисленные коэффициенты контроллера и использовать уже их в зависимости от текущего состояния.

Предложенная автором данного доклада идея о предварительном подсчете и размещении в памяти устройства коэффициентов представляется в целом достаточно адекватным выходом из ситуации. Однако несколько сомнительным кажется возможность хранения вообще всех возможных коэффициентов даже в условиях поставленных ограничений. По крайней мере, в докладе никаких оценок на используемую в этом случае память представлено не было. Вероятно, правильный путь здесь лежит в некотором компромиссе между использованием памяти и вычислениями в реальном времени. При этом хранить надлежит коэффициенты, отвечающие наиболее характерным состояниям (поиск которых также является интересной задачей).

В целом, и сам доклад, и задача, которую ставит перед собой его автор, представляются достаточно интересными. Не вполне понятной осталась глобальная цель исследования: планирует ли автор повысить качество автопилотов? каковы претензии к имеющимся алгоритмам? Также в качестве недостатка хочется отметить практически полное отсутствие ссылок: в докладе представлено множество различных подходов и методов, и также делаются заявления относительно их скоростей, точности и прочих параметров, однако, поиск соответствующей литературы зачастую остается за слушателем.