Содержание.

Введение.

1. Трансверсально-изотропный объект управления, как особый класс объектов управления. Задача управления положением центральной оси ОУ. Плавающий базис. Уравнения движения твердого тела в системе плавающего базиса. Декомпозиция задачи управления положением центральной оси на задачу ориентации и задачу стабилизации.
2. Анализ и выбор параметров ориентации, задающих положение плавающего базиса. Задача ориентации в терминах различных параметров.
   1. Система поворотов zxz.
   2. Система поворотов xyz
   3. Система поворотов xyz с вращающейся опорной плоскостью.
   4. Задача о имитации вектора относительного поворота.
   5. Симметричные системы параметров.
3. Поведение реального объекта в условиях неидеальности:
   1. Несимметричность. Неидеальность тензора инерции, и несиметричность коэффициентов усиления исполнительной системы.
   2. Анализ динамической ошибки исполнительной подсистемы в терминах плавающего базиса.

1. Квадрокоптер. Уравнения движения. Принцип управления движением.
2. Следящая система управления квадрокоптером.
   1. Датчики и навигационная система.
   2. Блок вычисление уставки стабилизационной задачи.
   3. Регулятор системы стабилизации.
   4. Блок коррекции перекрёстной связи.
   5. Блок преобразования координат.
   6. Исполнительная подсистема.
   7. Регулятор угловой скорости вращения диска.
3. Постановка задачи о поиске оптимальной траектории вращения объекта, обладающнго гироскопическим характером движения.
4. Модель аппарата в системе Matlab.
5. Макет квадрокоптера.
   1. Апаратное обеспечение макета.
   2. Система управления.
   3. Технологическое програмное обеспечение макета.
   4. Наземная часть. Технологическое програмное обеспечение наземной части.

Объектом исследования настоящей работы является особый класс систем управления, предназначенных для работы с трансверсально-изотропными объектами управления.

Термин трансверсально-изотропный происходит из механики и теории сред, где им обозначаются объекты, среды и системы, свойства которых имеют осевую симметрию, притом, что свойства объекта вдоль оси симметрии существенно отличаются от свойств в направлении перпендикулярном к этой оси. Простейшими примерами является такое твердое тело, как диск, и такая оболочка, как труба. В контексте данной работы термины «трансверсально-изотропный» и «осесимметричный» можно считать синонимами.

Осевая симметрия, наличествующая в системе, вне зависимости от её физической природы и контекста задачи, приводит к некоторым (порой достаточно существенным) упрощениям описывающей такую систему математической модели. В силу этого, поведение осесимметричных объектов более предсказуемо, что даёт повод интересоваться такими системами при решении инженерных задач.

Однако, в контексте решения задач навигации и ориентации ЛА, трансверсально-изотропные системы представляют интерес и по другой причине. В силу того, что возможности аппарата идентичны в любых направлениях, лежащих в плоскости диска, физические возможности аппарата по осуществлению движения инвариантны к конкретному углу поворота объекта в плоскости диска (дисковый поворот). Иными словами, если существует возможность осуществления манёвра, при одном дисковом повороте, то и при любом другом дисковом повороте, при прочих равных, может быть осуществлен тот же самый маневр аналогичным образом.

Инвариантность свойств объекта к дисковому повороту, позволяет существенно развить возможности аппарата к совершению им манёвров, на фоне упрощения математической модели, связанном с осесимметричностью аппарата.

Основной идеей системы управления трансверсально-изотропными объектами является то, что основной контур системы управления должен осуществлять решение задачи навигации ничего не зная о текущем дисковом повороте. Тогда, с точки зрения основного контура, ведающего, допустим, решением задачи траекторного управления, ориентация трансверсально изотропного-объекта может описываться не тремя координатами, а всего двумя. Это позволяет существенно упростить систему управления таким объектом.

Однако, в то же время необходимо корректно, тоесть согласованно с расчитанным управлением, подать управляющие воздействия на исполнительные органы аппарата, что невозможно без знания текущего дискового поворота.

Это является предпосылкой для декомпозиции задачи, а именно разделения её на задачу управления навигацией и ориентацией дискового объекта.

Для дальнейшего обсуждения свойств данного класса объектов удобно ввести некоторые термины, а также сформулировать определение исследуемого класса объектов.

Трансверсально изотропный объектом называется такой объект, уравнения движения которого имеют один и тот же вид, если они записаны в проекциях на координаты любого связанного базиса, принадлежащего семейству ортогональных связанных базисов, обладающих одной общей осью.

Общая ось семейства базисов в дальнейшем называется центральной. При этом совокупность осей отличных от центральной образует плоскость диска, перпендикулярную центральной оси. Отличные от центральной оси любого связанного базиса называются парой дисковых осей. В дальнейшем, когда речь идёт о связанном базисе, имеется ввиду один произвольный базис принадлежащих описанному семейству. В качестве примера объекта, обладающего исследуемыми свойствами в данной работе рассматривается такой ОУ, как квадрокоптер. В случае квадрокоптера, связанным базисом удобно считать базис, дисковые оси которого расположены по крестовине аппарата.

Рис.1

Введенная система координат отличается от общепринятых систем координат, применяемых для описания ЛА. Ось z объекта в начальном положении направлена вверх. Это объясняется тем, что управление трансверсально-изотропным объектом полностью определяется управлением его центральной оси, а в случае квадрокоптера, по этой оси будет направлен вектор тяги аппарата. При составлении уравнений движения удобно согласовать направления вектора тяги с одной из осей. Выбор же в качесве этой оси оси z обусловлен тем, что для описания трансверсально-изотропных объектов, удобно в качестве последней координаты, задающей ориентацию объекта, использовать поворот в плоскости диска. Соотнесение третьего поворота с третьей осью z является органичным.

Так же вводится дополнительный базис, называемый плавающим.

**Плавающий базис.**

Плавающим базисом называется такой связанный с центром масс аппарата ортогональный базис, одна из осей которого совпадает с центральной, притом что две другие могут разворачиваться независимо от поворота самого аппарата.

Рис.2

Таким образом, базис имеет свойство как бы плавать в плоскости диска относительно связанного базиса.

**Описание движения трансверсально изотропных систем в терминах плавающего базиса.**

Для записи уравнений динамики движения трансверсально-изотропной системы удобно пользоваться концепцией введенного выше плавающего базиса.

Действительно, то, что плавающий базис не связан жестко с дисковыми осями связанной системы, но при этом жестко связан с центральной осью отражает свойства системы (инвариантность к дисковому развороту). Следует заметить, что связанный базис при этом развернут относительно плавающего на угол диского поворота, что позволяет, зная координаты и состояние объекта в проекциях на координаты плавающего базиса, пересчитывать информацию, записанную в проекции на оси плавающего базиса и на связанный базис.

Положение плавающего базиса, очевидно, задаётся тремя координатами, две из которых должны явно описывать направление центральной оси. Что до третьей координаты, которой является угол текущего разворота плавающего базиса в плоскости диска, то в силу искусственной природы построенного базиса, угол дискового поворота может быть выбран произвольно, и в том числе считаться нулевым. Таким образом угловое положение плавающего базиса может точно также, как и угловое положение центральной оси, в любой интересующей нас системе координат задаваться всего двумя координатами.

Рассмотрение уравнений движения в плавающем базисе, не связанным с дисковым поворотом позволяет получить семейство решений, инвариантных к дисковому повороту и которые можно использовать при различном координатном описании углового положения центральной оси.

**Уравнения движения твёрдого тела в системе плавающего базиса.**

Запишем уравнения вращательного движения изотропно-трансверсального объекта, взятого на оси его плавающего базиса.

Введем «плавающий» базис таким образом, что оси лежат в плоскости диска, угол между базисами назовём , причем не является константой .

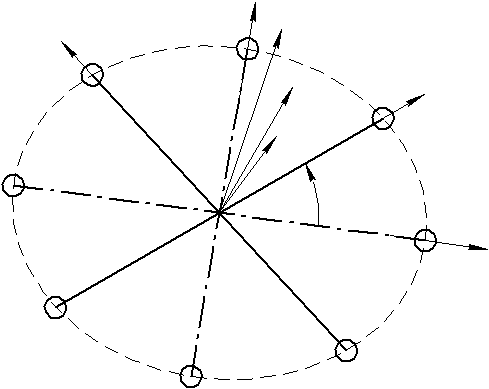


Рис.4 Плавающий базис

Запишем уравнения Эйлера для динамики вращательного движения твёрдого тела:

Используя формулу Бура, можно записать уравнения динамики в плавающем базисе:

При этом, – угловая скорость аппарата, а - угловая скорость плавающего базиса.

Распишем уравнение в координатах плавающего базиса. По условию задачи, плоскость задаваемая осями плавающего базиса всегда совпадает с плоскостью аппарата. Это условие будет выполняться только в том случае, если угловые скорости базиса и аппарата вокруг осей и будут равными в любой момент времени. Так же существует кинематическое соотношение, связывающее скорости разворота вокруг оси z аппарата и базиса.

Тогда

То есть,

Полученное уравнение есть общее уравнение для задачи динамики в осях плавающего базиса.

1. Задача ориентации плавающего базиса. Общее уравнение.

Как было сказано выше, необходимо два параметра, чтобы описать положение центральной оси аппарата. Однако, описание положения плавающий базис, через который предполагалось решать задачу, имеет три степени свободы и требует трёх параметров. Для того, чтобы свести три параметра связанного базиса к двум параметрам, задающим положение центральной оси, наложим условие на один из поворотов, определяющих поворот в плоскости диска. Проще всего приравнять его нулю.

Всегда возможно записать уравнение связи угловых скоростей с параметрами ориентации.

В общем виде оно выглядит следующим образом:

Однако, для решения некоторых задач могут пригодится системы с разворачивающимся опорным базисом. Такое уравнение, в силу принципа обращенного движения запишется как:

Можно обратить зависимость.

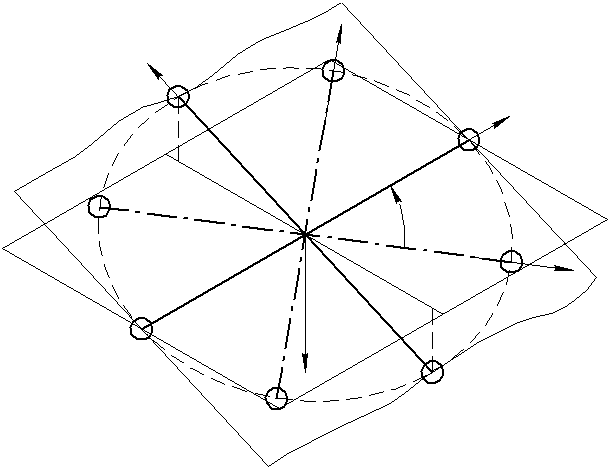
, где – инкрементные повороты ().

1. Уравнения ориентации в разных системах параметров.

Рассмотрим несколько примеров выбора систем координат, и выведем уравнения движения объекта в этих системах координат.

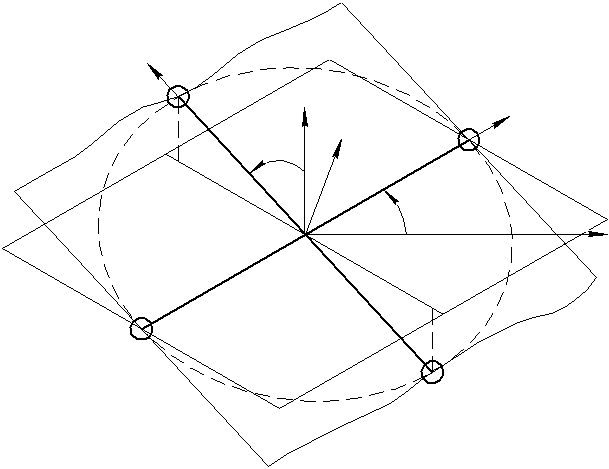
* 1. Системы последовательных поворотов.

2.1.1.Система углов Эйлера. (Система поворотов zxz)



*Плоскость   
диска*

*Плоскость   
горизонта(опорная)*



*Плоскость   
диска*

*Плоскость   
горизонта(опорная)*

Рис. 6 Система в углах Эйлера, задачи построения базиса и ориентации.

Для системы последовательных поворотов zxz, уравнение ориентации запишется как

Или в форме 7.3.2

Подставляя полученные зависимости в уравнение 7.1.3, получаем:

Пусть моменты, вызванные слагаемым , считаются скомпенсированными за счёт управления:

Тогда уравнения динамики в параметрах ориентации упростятся до вида:

Об этих уравнениях можно сказать несколько вещей:

- Система имеет особую точку при . При , уравнение становится линейным.

- Если опорная плоскость совпадает с плоскостью горизонта, угол , а угол определяет величину этой проекции, что удобно для навигации, однако рабочие режимы аппарата близки к особой точке и далеки от линейной области.

* + 1. Система поворотов yxz.

Уравнение ориентации:

, а уравнения динамики, опуская вывод (аналогично 8.1.1):

*-* Можно видеть, что уравнения соответствуют уравнениям в 8.1.1, со сдвигом угла на 90ᵒ.

- Если опорная плоскость вводится согласно рис. 6 , то можно считать, что система удобна для описания движения параллельно какому-то направлению. Предпочтительное направление задаётся ориентацией опорной плоскости.

- По сравнению с порядком zxz, особая точка сместилась на одну из горизонталей.

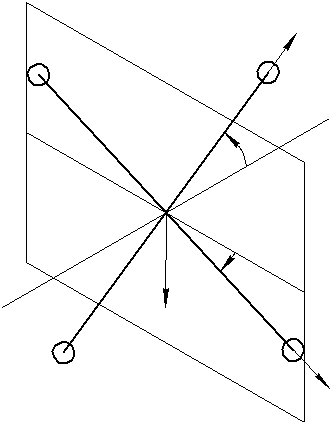


Рис. 6 Задача в базисе xyz.

Система yxz с вращающейся опорной плоскостью.

Система поворотов yxz удобна для построения системы стабилизации, но ограниченность её определённым направлением неудобно для практического использования. Чтобы решить эту проблему, вернемся к уравнению 7.3.2 и запишем его в более полной форме. Пусть задаёт вращение опорной плоскости вокруг вертикальной оси земной системы.

, пренебрегая слагаемым, которым пренебрегали в 8.1.1, считая скомпенсированным,

, откуда

* Выражения получаются достаточно длинными, но следует заметить, что при малых скоростях и ускорениях доворота базиса, соответствующими слагаемыми можно пренебречь, и решать задачу как задачу построения следящей системы, на основе уравнений, выведенных в 8.1.2.
* Построенная система параметров может быть использована для движения по маршруту, или для навигации относительно объекта (при помощи камеры). В таком случае, становится функцией линейных скоростей.

Распишем, также, уравнение для :

Заметим, что в случае, если и, введя угол, такой что , можно прийти к существенным упрощениям.

Построенную систему можно считать системой четырех последовательных поворотов:

Причем, в поворотах решается задача ориентации. В поворотах – задача стабилизации. А последний поворот решает задачу построения плавающего базиса.

Упрощенная система уравнений, считая гладкой функцией , выглядит как:

Итого:

* 1. Системы параметров ориентации, отличные от систем последовательных поворотов.
     1. Задача о векторе относительного поворота.

Системы стабилизации, работающие с системами последовательных поворотов имеют недостаток в виде явления, которое можно назвать «несогласованным разворотом». Это значит, что системы стабилизации, работающие по двум различным каналам слабо связаны друг с другом. Совместные действия по двум каналам могут быть крайне неоптимальными.

Этого недостатка лишены сиситемы, работающие с вектором относительного поворота. Однако им сложно воспользоваться для построения задачи стабилизации.

Тем не менее попробуем построить систему аналогичную по свойствам вектору конечного поворота, построенную на основе плавающего базиса. Возьмём за основу систему поворотов yxz и зададим вращение опорной плоскости с тем, чтобы ось в той плоскости, которую определяет заданный вектор относительного поворота.

При этом по построению. Можно показать, что вектор направлен параллельно оконечному вектору поворота, .

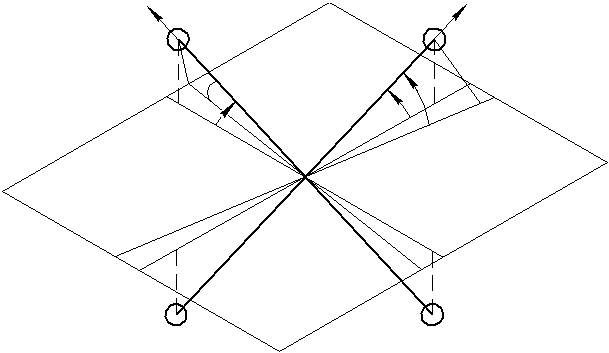
* Уравнения имеют сравнительно простой вид.
* Разворот выполняется с подавлением . При , система становится линейной, но при сближении векторов, текущего и целевого положения, система разваливается.
* Предлагается для решения задачи доворота вблизи целевого положения вектора, перейти к решению задачи о поворотах yxz, с зафиксированной плоскостью. В момент такого переключения, опорную плоскость новой задачи оставить от старой задачи, что позволит не пересчитывать ориентацию объекта.

8.2.2. Симметричные системы координат.

Поскольку квадрокоптер является изотропной системой, относительно осей и , можно предположить, что система координат, которая используется, по крайней мере, для задачи стабилизации вокруг уставного положения вектора, будет хорошо работать, будучи симметричной. Системы последовательных поворотов лишены этого свойства.

Одной из систем симетричных параметров является система кватернионов, однако в ней уравнения становятся сильно нелинейными. Могут быть построены и другие системы симетричных параметров.

Например, в качестве симметричной системы может быть рассмотрена система, использующая в качестве параметров углы



* Систему можно использовать для стабилизации уставного положения.
* В близи уставного положения – линейность, симметричность.
* Сложность уравнения движения, после подстановки уравнений параметров ориентации.

При анализе системы в рассматриваемом режиме можно выделить три дополнительных типа погрешностей различной природы.

А именно, ошибки связанные с:

- несимметричностью.

- недокомпенсацией.

- неидеальностью исполнительных устройств.

Несимметричность.

При выводе уравнений динамики системы вводились предположения, что

А) тензор инерции дисковый

Б) каналы управления в плоскости диска идентичны.

Разумеется, в силу того, что данное приближение относится к идеальному случаю, на практике появится ошибка, связанная с неидеальностью этих характеристик.

Рассмотрим вопрос о неидеальности дискового тензора инерции:

Пусть тензор инерции имеет вид:

(Предположим, что начальные оси соответствуют главным осям инерции)

Тогда:

Если подставить этот тензор в уравнение… , получим

Схема квадрокоптера получается достаточно удачной за счет

Погрешность недокомпенсации:

Эксперимент.

Погрешность

Неидеальности исполнительных устройств:

Исполнительная система регулятор+двигатель представляет из себя сложную динамическую систему, характеризующуюся вектором параметров состояния, размерность которого в общем случае неизвестна.

Динамика каждого из каналов исполнительной подсистемы описывается уравнением

(В силу идентичности двух каналов , )

Концепция плавающего базиса предполагает выработку управляющего воздействия по каналу, в общем случае, не совпадающему ни с одной из реальных исполнительных подсистем.

Введем в рассмотрение виртуальную исполнительную подсистему, такую, что мгновенная динамика этой системы будет описывать связь входных (сигналы управления) и выходных (, ) параметров. При этом вектора и будут являться векторами состояния такой системы.

В силу свойств трансверсально-изотропных систем, мгновенное движение аппарата описывается эквивалентно независимо от текущего разворота базиса, тоесть (считая плавающий базис мгновенно связанным с аппаратом), аналогично \*\*\*\*\* получаем :

Причем, в силу построения плавающего базиса,

, что впрочем, неверно для плавающего базиса в общем случае, так как на самом деле мгновенно связанным с аппаратом он не является.

Рассматривая исполнительную систему обособлено от всей системы управления в целом, следует заметить, что изменение ориентации плавающего базиса относительно связанной системы не может никоим образом повлиять на динамику объекта управления, а движения, связанные с динамикой объекта не влияют на ориентацию базиса. Из этого можно сделать вывод, что относительно двух этих движений выполняется принцип суперпозиции. Это означает, что поворот базиса будет учтён в уравнениях динамики виртуальной исполнительной подсистемы как отдельное слагаемое.

Рассмотрим влияние разворота базиса на уравнения динамики виртуальной исполнительной подсистемы. Для этого повернем базис на малый угол . При этом, в силу свойств трансверсально изотропных систем весь вектор параметров также развернётся

В силу малости угла

Таким образом приращение

С учетом вышесказанного, уравнения динамики виртуальной исполнительной подсистемы в пространстве состояний примут вид:

Предположим, что в качестве математической модели двигателя можно с достачной долей достоверности выбрать апериодическое звено, а в качестве модели регулятора – ПИ регулятор.

Тогда замкнутая ПФ исполнительной системы имеет вид:

Уравнение пространства состояний двух каналов исполнительной системы с учетом переноса состояния запишется в виде.

Важно заметить, что в силу изотропности системы, в случае, если движение системы не связано с осуществлением сложного манёвра, , а потому слагаемое переноса пренебрежимо мало.

Для того, чтобы полностью избавится от явления переноса состояния между каналами, необходимо полностью подавить слагаемые, содержащие .

В рассматриваемом макете такое управление невозможно, так как необходимо осуществлять управление сразу по всем параметрам состояния, а также иметь информацию о текущих значениях этих переменных.

Это следствие недостатка конструкции исполнительной подсистемы, а именно того, что регулятор двигателя вынесен за рамки системы управления в отдельное устройство. Если бы мы могли непосредственно воздействовать на все переменные этой системы в соответствии с изложенными соображениями, можно было бы полностью подавить явление переноса состояния, за счет подачи управляющего сигнала компенсации.

Аналогично можно поступить, если ПФ регулятора имеет более высокие порядки.

В случае, если ПФ двигателя имеет более высокий порядок, ситуация несколько хуже, в силу того, что невозможно непосредственно влиять на состояние механической системы. В случае выявления такой проблемы, требуется дополнительное исследование (возможно решение задачи АКОР)

Таким образом,

Для подавления явления «переноса состояния» необходимо пересмотреть конструкцию аппарата, а именно, внести регуляторы двигателей в основную систему управления с тем, чтобы было возможно изменять интегральную составляющую регулятора. Следует однако заметить, что, как показывает моделирование, данное явление осуществляет заметное влияние на динамику только при достаточной инерционности двигателей и достаточно высоких скоростях разворота базиса, в частности связанных с высокими . В случае, если исполнительная система имеет достаточное быстродействие, а мала, явлением можно пренебречь. Не учет явления переноса состояния может привести к появлению в системе колебаний при осуществлении манёвров.

3.3. Компенсация гироскопического слагаемого перекрёстной связи в уравнениях движения.

При анализе уравнений динамики (1. .3) было выявлено нелинейная перекрёстная связь:

Для того, чтобы построить систему управления с применением линейных регуляторов необходимо исключить влияние этого слагаемого на динамику системы.

В ходе исследования было рассмотрено несколько методом подавления влияния этого слагаемого.

Пренебрегая в уравнениях () слагаемым, зависящем от , имеем

Как наиболее простым решением, избавляющим уравнения от рассматриваемого слагаемого рассматривался вариант добавления к управляющим моментам и составляющей численно равных моментам перекрёстной связи.

Такой путь, однако, в силу не идеальности исполнительной системы и запаздывания компенсационного воздействия приводит к появлению затухающих колебаний, переходящих между каналами управления (циклическое движение).

Кроме того, в контексте задачи об управлении квадрокоптером, не представляется возможным расчитать необходимый сигнал компенсации, приводящий к достаточно точной корректировке в силу того, что управляющий сигнал, связан с моментами управления через коэффициент усиления винта, который в свою очередь не является константой, сложно вычислим и до определённой степени малопредсказуем.

Этих недостатков лишена компенсация по возмущению.

Рассмотрев схему с учетом передаточной функции исполнительной системы получаем следующую структурную схему:



Здесь сплошными линиями обозначается неизменяемая часть, а пунктирными – предполагаемая коррекция, которая решает проблему компенсации с учетом неидеальности исполнительной системы. Несложно убедиться в том, что влияние перекрёстных связей в левой и правой части схемы взаимокомпенсируется.

Недостатком схемы () является наличие искусственно введенных интегральных переменных, по сути представляющих модель угловой скорости системы при идеальных исполнительных устройствах. В силу того, что интеграл может накапливать ошибку с течением времени, требуется коррекция соответствующей накопленной величины. Следует также учесть, что смена опорного базиса приведёт к тому, что накопленная информация перестанет быть корректной. Это также следует учитывать при построении системы управления.

При введении соответствующей коррекции поведение объекта выглядит так, как будто уравнения его динамики имеют вид

4.Следящая система.

На основе изложенного выше теоретического исследования была создана следящая система управления макетом квадрокоптера.

4.1 Датчики и навигационная система.

Для решения задачи оценки текущей ориентации объекта использована система на базе гироскопа, магнетометра и акселерометра (MARG система). Анализ информации и непосредственное вычисление ориентации осуществляется по алгоритму Маджвика.

Входными данными системы оценки ориентации является вектор показаний трёхосного магнетометра , трёхосного акселлерометра , трехосного гироскопа . Для использования в алгоритме оценки входные данные представляются в виде вырожденных кватернионов.

Оценка ориентации также представлена в виде кватерниона .

Итерационная формула имеет вид:

, где

*–* это ожидаемые (предсказанные) значения.

– это горизонтальная и вертикальная составляющая магнитного поля.

В формуле 8.1.3 и – это ошибки между ожидаемыми показаниями датчиков и измеренными. В силу малости ожидаемых ошибок, а также равенства модулей этих кватернионов, ошибку можно считать кватернионом инкрементного поворота ошибки.

Множитель представляет из себя матрицу Якоби:

Данная матрица является функцией текущего кватерниона ориентации и может быть рассчитана как

, где – матрица поворота.

Откуда

Таким образом, для коррекции оценки параметров ориентации используется метод градиентного спуска.

8.2 Блок вычисления уставки.

При исследовании уравнений движения было введено разделение задачи на задачу ориентации и задачу вычисления базиса. При применении даных систем к практическим задачам и построению ральных систем управления, задачу ориентации также удобно разделить на задачу вычисления ориентационной уставки и задачу стабилизации по этой уставке.

Анализ показывает, что эти две задачи могут быть развязаны вплоть до используемых координат.

Непосредственную связь между задачами удобно реализовывать через аппарат кватернионов.

В предлагаемой системе кватернионы выступают в качестве интерфейса между всеми элементами системы управления.

Уравнение преобразования информации об угловой информации в системе выглядит следующим образом

, где

- кватернион, содержащий информацию об уставке по ориентации.  
- кватернион, содержащий информацию от навигационной системы о положении связанной системы относительно платформенной системы координат.

– кватернион, содержащий информацию о положение связанной системы относительно заданной уставки ориентации.

В случае использования системы двух последовательных поворотов для решения задачи ориентации, уравнение расчета кватерниона ориентации имеют вид.

* 1. Регулятор системы стабилизации.

При решении задачи построения системы стабилизации за основу была взята идея компенсации всех нелинейных связей системы с тем, чтобы для решения задачи стабилизации мог быть использован линейный регулятор.

В целом эта задача была решена.

Для решения задачи стабилизации вводятся специальная система из двух координат, в которой и решается задача стабилизации. В силу того, что задача стабилизации решается при достаточно малых отклонениях от ориентационной уставки, допустимо рассмотреть задачу динамики системы стабилизации в линейном приближении (см ……….)

Тогда каждая координата, в линейном приближении, будет представлять собой угол поворота, взятый вокруг одной из осей плавающего базиса.

- Пллоская задача.

Для увеличения быстродействия реакции на внешнее воздействие, в цепь могут быть включены диференцальные звенья.

-Схема системы стабилизации одного канала.

* 1. Блок коррекции перекрёстной связи.

При анализе уравнений динамики (………….) было выявлено нелинейная перекрёстная связь:

Для того, чтобы построить систему управления с применением линейных регуляторов необходимо исключить влияние этого слагаемого на динамику системы.

В ходе исследования было рассмотрено несколько методом подавления влияния этого слагаемого.

Пренебрегая в уравнениях () слагаемым, зависящем от , имеем

Как наиболее простым решением, избавляющим уравнения от рассматриваемого слагаемого рассматривался вариант добавления к управляющим моментам и составляющей численно равных моментам перекрёстной связи.

Такой путь однако, в силу не идеальности исполнительной системы и запаздывания компенсационного воздействия приводит к появлению затухающих колебаний, переходящих между каналами управления (циклическое движение).

Кроме того не представляется возможным расчитать необходимый сигнал компенсации, приводящий к достаточно точной корректировке в силу того, что управляющий сигнал, связан с fмоментами управления через коэффициент усиления винта, который в свою очередь не является константой, сложно вычислим и до определённой степени малопредсказуем.

Этих недостатков лишена компенсация по возмущению.

Рассмотрев схему с учетом передаточной функции исполнительной системы получаем следующую структурную схему:



Здесь сплошными линиями обозначается неизменяемая часть, а пунктирными – предполагаемая коррекция, которая решает проблему коррекции с учетом неидеальности исполнительной системы. Несложно убедиться в том, что влияние перекрёстных связей в левой и правой части схемы взаимокомпенсируется.

Недостатком схемы () является наличие искусственно введенных интегральных переменных, по сути представляющих модель угловой скорости системы при идеальных исполнительных устройствах. В силу того, что интеграл может накапливать ошибку с течением времени, требуется коррекция соответствующей накопленной величины.

С целью компенсации этой ошибки предлагается комплиментарная коррекция по , :

Преимуществом данной схемы является то, что для осуществления коррекции не обязательно знать коэффициент усиления исполнительной системы, но, однако, попрежнему необходимо знать моменты инерции и .

Идея предлагаемого способа состоит в том, что, если, реализации предлагаемой стратегии удаётся добиться, то поведение объекта выглядит так, как будто уравнения его динамики имеют вид

…………………..

8.6. Блок пересчета координат.

Блок пересчета координат призван совершать взаимное преобразование сигналов датчиков и управления между связанным базисом и плавающим.

……………….

8.5. Исполнительная подсистема.

Исполнительная подсистема квадрокоптера представляет собой бесколлекторный вентильный двигатель и его регулятор.

В процессе анализа динамики исполнительной подсистемы в осях плавающего базиса был выявлен эффект переноса информации из одного канала в другой. Это связано с тем, что в силу инерционности исполнительных органов, а также постоянной смены угла пересчета , реакция на управление в общем случае может прийти не по тем осям, на которые изначально было выдано управляющее воздействие. Явлению переноса информации подвержен весь вектор состояния канала, включая как механические, так и вычислительные переменные (анализ этого явления приведен в ……..)

В рамках задачи управления квадрокоптером, можно принять передаточной функцией исполнительной подсистемы апереодитеческое звено. В случае, если такая модель с достаточной точностью опишет реальные физические процессы, вектор параметров состояний исполнительной подсистемы быудет содержать всего одну переменную.

Тогда для компенсации рассматриваемого эффекта будет достаточно охватить систему дополнительной перекрёстной обратной связью по оборотам вращения винта.

К сожалению, класический подход к построению таких систем предполагает независимость каналов, а также незавсимость регулятора двигателя от основной системы управления аппаратом.

В рамках такого подхода невозможно осуществить рассчитанную коррекцию.

Таким образом можно сделать вывод о недостатке классической схемы и необходимости внесения конструктивных изменений.

8.7. Регулятор вращения в плоскости диска.

Для поддержания угловой скорости вращения аппарата в плоскости диска используется простой ПИ регулятор с отрицательной обратной связью по .

1. Макет квадрокоптера.
   1. Аппаратное обеспечение макета.

Для исследования и демонстрации работы СУ собран макет ЛА.



Состав макета:

- Рама четырехлучевая (материал нэйлон) x1

-Двигатели A28M 1100Kv Brushless Outrunner Motor x4

- Регуляторы Marcus point 20 x4

- Полётный контроллер CRIUS AIOP v2.0 x1

- Wifi роутер TPlink MP3020 x1

- Ультразвуковой дальномер x1

- Плата разводки питания x1

- Аккумулятор x1

В составе полётного контроллера CRIUS AIOP v2.0 присутствуют датчики

Контроль и управление осуществляются при помощи:

Персонального компьютера (ОС Ubuntu) и геймпада.

**Параметры макета.**

Пренебрегая массой всех частей, кроме рамы и двигателей получаем.

11.2 Система управления.

11.3 Технологическое программное обеспечение.

Програмное обеспечение макета строится на базе модулей проекта GenOS. GenOS – это проект автора настоящей работы, который развивается в ключе поддержки разработки неотлаженных програмных и аппаратных средств, таких как рассматриваемый здесь макет квадрокоптера и удалённого управления такими объектами.

Operating System Generator, или GenOS, представляет набор C++ библиотек, предназначенных для нужд быстрого прототипирования, тестирования и отладки, удалённого управления, а также использования в любительской робототехнике, или для нужд обучения.  
  
GenOS представляет собой модульный конструктор, элементы которого предназначены для решения узких системных задач. Уделяется много внимания, с одной стороны, независимости отдельных модулей, а с другой удобству межмодульной комутации. Это позволяет использовать модули как отдельные вспомогательные элементы, так и в составе сложной системы.   
  
Genos строится таким образом, чтобы сохранять работоспособность в условиях недостаточной инициализации рабочей среды, отсутствия драйверов работы с таймерами и системами ввода-вывода.  
Genos использует динамически выделяемую память, но может и не делать этого. Genos написан на C++, что предполагает инициализацию глобальных конструкторов, но способен работать и в условиях, когда соответствующая инициализация не выполнена. Служба времени Genos опирается на аппаратные таймеры для диспетчеризации и контроля интервалов, но сохраняет работоспособность и без настройки оных.   
  
Концепция GenOS позволяет пользователю, начав с низкоуровневой отладки железа, постепенно, но в то же время достаточно быстро, нарастить функционал програмного ядра с использованием модулей Genos как основного или же, как вспомогательного средства.  
  
Модули GenOS способны к работе как на голом железе в составе управляющей ОС, так и качестве приложения любой другой операционной системы. Работая в качестве приложения, GenOS рассматривает API внешней системы как внешнюю среду, общеннее с которой может строится посредством драйверов. Возможность реализации GenOS в качестве приложения с одной стороны упрощает отладку GenOS ядра, а с другой позволяет использовать возможности родительской ОС по осуществлению комутации с другими GenOS сборками и управлению переферийными устройствами.  
  
Развитые средства символьного ввода-вывода (наследство от Arduino) позволяют осуществлять комутацию сборок Genos независимую от физической или програмной реализации исполняющих устройств, и средств передачи данных. Использование Genos сборок в качестве интерфейса удалённого доступа к Genos же сборкам позволяет обойти проблемы, связанные с реализацией протоколов обмена клиент-сервер, так как, по сути, общение производится двумя экземплярами одного и того же модуля (при этом реализация сборок может существенно различаться).  
  
Несмотря на наличие собственной системы ввода вывода, предоставляется возможность использования стандартных clib средств ввода-вывода, но упор делается на собственную реализацию, максимально использующую возможности C++.  
  
Служба сборки GenOS строится из расчета того, чтобы не навязывать пользователю определёного формата построения проекта. Использования отдельного модуля возможно подключением пары строк к Makefile, а структура каталогов и намеренная инкапсуляция кода дают возможность копирования отдельных модулей в пользовательские проекты.

В варианте, представленном в текущий момент на макете квадрокоптера, ОС имеет

- службу времени.

- событийный диспетчер отложенного вызова.

- консоль в составе read-line библиотеки и обработчиком потока ввода-вывода.

- модуль регистрации консольных команд.

- ардуиновскую систему потоков ввода-вывода.ть

- модуль I2C интерфейса.

- аппаратно независимый алгоритм работы с IMU.

- модуль удалённого доступа к глобальным переменным.

Наиболее значимые для работы с тестируемым ПО функции –

- millis() – узнать текущее время в миллисекундах.

- CSH\_t::newTimer – вызвать определённую функцию через заданный интервал времени.

- command – Зарегистрировать функцию для доступа к ней через консоль.

Использование консольного интерфейса GenOS позволяет осуществлять удобную отладку и управления ПО макета (а также получения телеметрии), посредством стандартных эмуляторов терминала, таких как gtkterm.

Событийный диспетчер предоставляет удобный API для программирования интервалов опроса датчиков, диспетчиризации просчета навигационной задачи и управления двигателями.

Система GenOS также позволяет решать вопросы связанные с аварийным отключением исполнительной системы аппарата, при возникновении нештатных ситуаций (таких, как разрыв канала связи с наземной частью).

* 1. Наземная часть. Технологическое програмное обеспечение наземной части.

Программа наземной части комплекса также строится на базу модулей GenOS, работающих на базе Linux приложения.

В соответствии с концепцией GenOS, удалённое управление в части системных команд устройством осуществляется через консоль. Использование этого канала связи так же позволяет осуществлять удалённое управление потребной тягой, но частота такого интерфейса не является достаточной для управления полётом макета в силу того, что на приёмном конце требуется обработка строк, передающих информацию.

Обратный канал связи позволяет удалённо получать телеметрию макета, показания датчиков, текущее решение задачи ориентации, установленные флаги системы аварийного отключения и д.р..

Управление макетом осуществляется через консоль, либо непосредственным вводом управляющих команд, либо автоматической генерацией управляющих комманд. Автоматическая генерация осуществляется по данным снятым с пульта управления, в качестве которого в рассматриваемой системе (на текущий момент) установлен геймпад Threstmaster T-wireless black v.4.