

## ПОСТРОЕНИЕ АНАЛОГА ФИЛЬТРА МАДЖВИКА ДЛЯ ДАННЫХ ОРИЕНТАЦИИ ДАТЧИКОВ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ И СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

**Книжзов К.И.**, магистр, оператор 4 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация, e-mail: kknijov@mail.ru, тел.: 89137522447,

**Дергунов Т.А.**, бакалавр, оператор 5 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация, e-mail: tadergunov@yandex.ru, тел.: 89509026349,

**Коваленко Р.В.**, начальник 12 лаборатории испытательной (морской) ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», г. Анапа, Российская Федерация.

### Аннотация

Приведены результаты работ, выполненных в рамках исследования вопросов разработки унифицированной навигационной системы робототехнических комплексов военного назначения. Инерциальная навигационная система имеет погрешности, обусловленные возмущающими факторами различной природы, при этом в задаче навигации требуется очень высокая точность измерения некоторых параметров, в частности ориентации РТК в пространстве. Классический подход к компенсации погрешностей измерений ориентации с помощью инерциальных систем подразумевает использование данных акселерометра и магнитометра. В работе представлены исследования альтернативных способов фильтрации данных ориентации, а также предложен базовый алгоритм для фильтрации данных ориентации с помощью данных системы технического зрения.

**Ключевые слова:** наземный робототехнический комплекс; фильтр Маджвика; визуальная одометрия; ориентация в пространстве; техническое зрение; особые точки изображения; стереозрение.

Задача оценки ориентации РТК имеет множество различных способов решения: на основе спутниковой радионавигационной системы, с помощью инерциальных систем и т. д. Однако эти подходы связаны с рядом проблем. Так, например, трудность определения ориентации наземного робототехнического комплекса (РТК) на основе спутниковой радионавигационной системы (СРНС) состоит в том, что данные, поступающие с СРНС, могут быть недоступны на некоторых промежутках времени (из-за рельефа местности, погодных условий, плотной городской застройки, из-за отказа или неисправности аппаратуры).

Для устранения данной проблемы координаты наземного РТК могут дополнительно определяться с помощью инерциальной навигационной системы, которая размещается на наземном РТК, однако данные инерциальных систем зачастую сильно зашумлены, и даже различные способы фильтрации, такие как фильтр Калмана и фильтр Маджвика, могут не давать достаточной точности в связи с различными накапливаемыми погрешностями (дрейф нуля гироскопа, накопление ошибки как следствие двойного интегрирования ускорений). В связи с этим для уточнения ориентации РТК, помимо инерциальных датчиков, предлагается использовать систему технического зрения, не подверженную тем источникам искажений, которым подвержены гироскопы, акселерометры и магнитометры. В данном докладе будет рассмотрена задача совмещения данных датчиков угловых скоростей и данных, получаемых со стереопары видеокамер.

Задача фильтрации – задача оценки параметров системы по некоторым зашумленным измерениям. В задаче оценки ориентации чаще всего используются измерения инерциальных датчиков, как например фильтр Калмана ([2], [3]) или фильтр Маджвика [1]. Фильтр Маджвика – фильтр ориентации, основанный на объединении данных ориентации гироскопа с оценкой ориентации по данным акселерометра и магнитометра.

Алгоритм фильтра Маджвика состоит в решении задачи оптимизации (1):

$$\min_{\substack{\hat{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^4}} f(\hat{\mathbf{q}}, \mathbf{d}, \mathbf{s}) \quad (1)$$

В уравнении (1)  $\hat{\mathbf{q}}$  – вектор ориентации системы датчиков в кватернионном представлении,  $\mathbf{d}$  – вектор силы тяжести в системе координат земли,  $\mathbf{s}$  – вектор силы тяжести в системе координат датчика, определенный акселерометрами. Целевая функция  $f(\hat{\mathbf{q}}, \mathbf{d}, \mathbf{s})$  является разностью между значением вектора силы тяжести, переведенным в систему координат датчика посредством кватернионного поворота, и значением вектора силы тяжести, измеренным акселерометром (уравнение 2).

$$f(\hat{\mathbf{q}}, \mathbf{d}, \mathbf{s}) = \hat{\mathbf{q}}^* \otimes \mathbf{d} \otimes \hat{\mathbf{q}} - \mathbf{s} \quad (2)$$

Искомый кватернион ориентации датчика  $\hat{\mathbf{q}}$  находится из решения задачи оптимизации (2) с помощью метода градиентного спуска.

Объединение результатов обработки данных с акселерометров с данными гироскопов и магнитометров (при наличии магнитометра в системе датчиков) позволяет оценить ориентацию системы датчиков в пространстве.

Блок схема фильтра Маджвика для системы без магнитометра представлена на рис. 1 ниже.

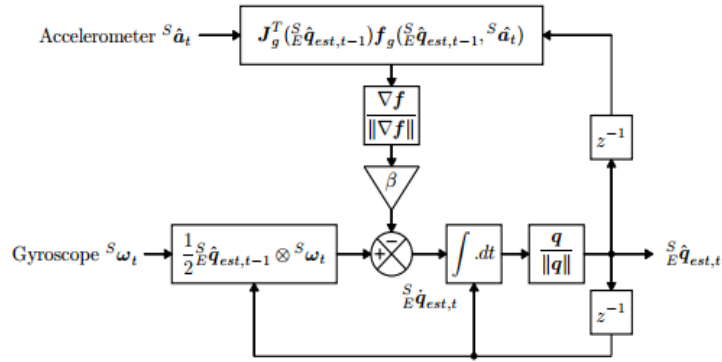


Рисунок 1 – Блок-схема фильтра Маджвика

Несмотря на то, что в оригинальной работе данный алгоритм предлагается исключительно для данных магнитометра и акселерометра, при внимательном изучении несложно заметить, что вместо данных акселерометра и магнитометра можно использовать измерения любых векторов, имеющих постоянное направление в глобальной системе координат. В данной работе предложен алгоритм получения таких векторов из данных стереопар изображений.

Задача определения перемещения РТК имеет множество подходов, однако нами будет рассмотрен подход, использующий алгоритмы поиска и отслеживания особых точек на потоке стереографических пар изображений. Данный подход подразумевает следующую последовательность действий:

- 1) Получение первой стереопары изображений, удаление искажений и т.д.;
- 2) Поиск особых точек на левом изображении и поиск этих же точек на правом;
- 3) Вычисление пространственных координат этих точек;
- 4) Получение второй стереопары изображений;
- 5) Поиск особых точек и вычисление их пространственных координат на второй стереопаре;
- 6) Определение изменения положения РТК по изменению координат особых точек.

Задача поиска особых точек изображений и задача получения пространственных координат точек по стереопаре на текущий момент уже хорошо изучены и имеют ряд стандартных решений. Так, например, в работе [4] подробно описан метод Гарриса (Harris) поиска особых точек, основанный на анализе гессиана функции интенсивности яркости изображения, решение задачи стереозрения можно найти в [5], поэтому в этой работе мы не будем останавливаться на этих вопросах.

Рассмотрим отдельно задачу определения перемещения РТК по изменению координат особых точек. Пусть  $X = (X_1, X_2, X_3)$  – координаты особой точки пространства в текущий момент времени,  $\tilde{X} = (\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \tilde{X}_3)$  – ее же координаты в предыдущий момент. Так как перемещение РТК являет собой композицию линейных преобразований вращения и «параллельного переноса», т. е. аффинное преобразование, то изменение этих координат так же описывается аффинным преобразованием. Таким образом:

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \\ \tilde{X}_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix}$$

В работе [6] предлагается решать данную систему для  $N$  особых точек методом наименьших квадратов, получая сразу искомое вращение и «параллельный перенос» системы координат камеры, однако

1) в нашей задаче мы предполагаем наличие данных гироскопа, поэтому у нас отсутствует необходимость в столь тщательном вычислении матрицы вращения;

2) для изолированной фильтрации ориентации нам необходимо предварительно рассчитать компоненту «параллельного переноса».

В этой же работе было упомянуто, что минимальное количество точек, необходимое для нахождения неизвестных параметров, равно четырем, но в действительности, учитывая особенности строения матрицы вращения (см., например, в [3]), можно обойтись тремя;

Таким образом, в дальнейшем будем предполагать, что в каждый момент времени нам известны координаты трех неподвижных особых точек в системе координат РТК (необходимо также требовать, чтобы эти точки не лежали в одной плоскости с РТК), расстояние от РТК до этих точек, а также угловые скорости, измеренные датчиком угловых скоростей.

Рассмотрим состояние системы в двух соседних моментах времени. Пусть  $Oxyz$  – система координат РТК в момент времени  $t_1$ ,  $\tilde{O}\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$  – система координат РТК в момент времени  $t_2$ , а  $a = (a_1, a_2, a_3)$ ,  $b = (b_1, b_2, b_3)$ ,  $c = (c_1, c_2, c_3)$  и  $\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}$  – координаты трех особых точек изображения в системах координат  $Oxyz$  и  $\tilde{O}\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$  соответственно. Пусть также особые точки не лежат на одной прямой и не лежат в одной плоскости с точкой  $\tilde{O}$ . Предположим что нам известны координаты вектора  $\overrightarrow{O\tilde{O}}$  в системе координат  $Oxyz$  (мы не будем описывать алгоритм его вычисления в силу его громоздкости, заметим лишь, что нам известны все необходимые данные, т. к. точка  $\tilde{O}$  является вершиной тетраэдра  $\tilde{O}abc$ , у которого известны координаты трех других вершин и длины всех сторон, т. е. данный тетраэдр полностью определен).

Несложно заметить, что:

$$\mathbf{a} = R * (\tilde{\mathbf{a}} - \overrightarrow{O\tilde{O}}), \quad (3)$$

где  $R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$  – матрица поворота. Таким образом вектор  $\frac{\tilde{\mathbf{a}} - \overrightarrow{O\tilde{O}}}{\|\tilde{\mathbf{a}} - \overrightarrow{O\tilde{O}}\|}$  для любого момента

времени может быть получен из вектора  $\frac{\mathbf{a}}{\|\mathbf{a}\|}$  поворотом системы координат, соответствующем повороту РТК в пространстве с момента времени  $t_1$  до момента  $t_2$ , что в полной мере аналогично поведению измерений направления ускорения свободного падения и направления на магнитный северный полюс, которые используются в алгоритме Маджвика.

*Модификация фильтра Маджвика.* Очевидно, что уравнение (3) можно переписать в кватернионном виде (аналогично уравнению (1)):

$$\tilde{A} = {}^S_E\hat{\mathbf{q}}^* \otimes A \otimes {}^S_E\hat{\mathbf{q}}, \text{ где } A = (0 \ \mathbf{a}), \tilde{A} = (0 \ \tilde{\mathbf{a}} - \overrightarrow{O\tilde{O}}),$$

где  $A = \frac{\mathbf{a}}{\|\mathbf{a}\|}$ ,  $\tilde{A} = \frac{\tilde{\mathbf{a}} - \overrightarrow{O\tilde{O}}}{\|\tilde{\mathbf{a}} - \overrightarrow{O\tilde{O}}\|}$ , а  ${}^S_E\hat{\mathbf{q}}$  – кватернион поворота для систем координат  $Oxyz$  и  $O\tilde{x}\tilde{y}\tilde{z}$  (такое представление ориентации описано, например, в п.2 в [1]).

Тогда по аналогии с подходом Маджвика, можно приближенно искать  ${}^S_E\hat{\mathbf{q}}$  как решение задачи минимизации

$$\min_{{}^S_E\hat{\mathbf{q}} \in \mathbb{H}^4} f({}^S_E\hat{\mathbf{q}}, A, \tilde{A}) \quad (3)$$

методом градиентного спуска, где

$$f({}^S_E\hat{\mathbf{q}}, A, \tilde{A}) = {}^S_E\hat{\mathbf{q}}^* \otimes A \otimes {}^S_E\hat{\mathbf{q}} - \tilde{A}. \quad (4)$$

Подставив функцию (4) в формулу (19) в работе Маджвика [1], мы получим формулу для получения приближенной оценки ориентации из визуальных наблюдений. Алгоритм объединяющего фильтра в этом случае будет полностью аналогичен формулам (35), (36), (38), (50) в этой же работе.

В ходе работы был проведен анализ предложенного Маджвиком подхода к фильтрации ориентации и возможности его применения к наборам измерений, отличным от предложенного в оригинальной работе [1], основных методов визуальной одометрии, а также предложена модификация фильтра Маджвика для датчиков угловых скоростей и систем технического зрения.

В данной статье описана идеализированная система, не были рассмотрены проблемы, связанные определением подходящего набора особых точек (исключение «вылетов», определение неподвижных точек), обновлением популяции особых точек в связи с изменением области видимости. В последующих работах предполагается рассмотреть подробнее данные вопросы, провести тестирование предложенного алгоритма и сравнительный анализ точности результатов, получаемых с помощью предложенного подхода, с результатами визуальной одометрии и результатами классических алгоритмов фильтрации данных инерциальных датчиков.

### Литература

1. S.O.H. Madgwick, An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, 2010. – 32 p.
2. Kalman R. E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems Trans. ASME (American Society of Mechanical Engineers), J. Basic Eng., 1960.
3. M. Pedley, M. Stanley, Open Source Sensor Fusion. <https://github.com/memsindustrygroup/Open-Source-Sensor-Fusion/tree/master/docs>
4. Гаганов В. Инвариантные алгоритмы сопоставления точечных особенностей на изображениях // Компьютерная графика и мультимедиа. – 2009. – Вып. № 7(1). – [http://cgm.computergraphics.ru/issues/issue17/invariant\\_features](http://cgm.computergraphics.ru/issues/issue17/invariant_features).
5. R. Hartley A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision
6. Девятериков Е.А., Михайлов Б.Б. Визуальный одометр //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012

