

Алгоритмическое и программное обеспечение задачи оценки параметров навигационной системы автономного автомобиля

Разработаны алгоритмы оценки параметров навигационной системы на основе различных линеаризаций фильтра Калмана. Представлена архитектура программной системы навигации автономного автомобиля. Система навигации является много-режимной и может переключаться между режимами, варьируя точность и загрузку центрального процессора системы. Различные режимы соответствуют различным реализациям фильтра Калмана, а также различным моделям движения. Архитектура системы описана с помощью унифицированного языка моделирования (UML).

Ключевые слова: автономный автомобиль, навигационная система, оценка состояния, фильтр Калмана, штатный и нештатный режимы

Введение

Несколько лет назад задача создания автономного автомобиля [1, 2] находилась на стадии лабораторных исследований. Для стимуляции этого процесса проводились и продолжают проводиться соревнования автономных автомобилей, например, DARPA Urban Challenge [3] или Grand Cooperative Driving Challenge.

В настоящее время процесс перешел в стадию промышленной разработки. Многие автопроизводители обещают выпуск своих версий автономного автомобиля в течение десятилетия. Основную сложность представляют задача распознавания окружающего пространства за счет использования сенсорики автомобиля [4] и задача точной привязки автомобиля к существующей карте местности [5]. Важной составной частью второй задачи является проблема наиболее точного определения координат, углов, скоростей и ускорений навигационной системой автомобиля.

Особенности оценки вектора состояния автомобиля

В лабораторных условиях возможно использование различных навигационных систем [6], однако в случае автомобиля, перемещающегося в условиях открытого пространства, целесообразно использование систем глобального спутникового позиционирования (GPS и ГЛОНАСС). Поскольку точность подобных систем не всегда достаточна для решения задач позиционирования автомобиля, в навигационную систему добавляют инерциальный блок, состоящий из трехосевого акселерометра и трехосевого гироскопа. В то же время для позиционирования исключительно с помощью инерциальной системы требуется ее высокая точность и, следовательно, стоимость, что исключает такой подход при серийном использовании. Таким образом, оптимальным является совместное применение обеих систем (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Использование различных типов сенсоров ставит перед разработчиком навигационной системы автомобиля задачу комплексирования данных. Одним

из наиболее удобных и часто используемых инструментов решения этой задачи является фильтр Калмана [7]. Он позволяет объединять данные, поступающие на различной частоте, легко варьировать веса различных измерений, а также менять модель оценки в зависимости от изменения окружающих условий.

Как правило, движение автомобиля характеризуется отсутствием проскальзывания колес, что позволяет вводить некоторые ограничения на модель движения и, тем самым, добиваться более точной оценки. Такой режим движения автомобиля будем называть штатным. Однако очевидно, что условие отсутствия проскальзывания колес выполняется в реальных условиях не всегда. В этом режиме, который мы назовем нештатным, необходимо применение другой модели движения, которая удовлетворяет соответствующим условиям.

Использование фильтра Калмана для оценки вектора состояния системы с большим числом параметров может приводить к высокой нагрузке на процессор вычислительной системы, особенно в случае большой частоты поступления входных данных. В лабораторных условиях есть возможность не экономить вычислительные ресурсы за счет использования мощных компьютеров. В то же время, для задач, предполагающих выпуск серийного продукта, оптимизация пути решения поставленной задачи дает возможность использовать вычислительный комплекс меньшей мощности и, следовательно, ведет к уменьшению себестоимости.

Модель движения автомобиля в штатном и нештатном режимах

Будем считать, что автомобиль движется в трехмерном пространстве. Выберем локальную навигационную систему, привязанную к месту действия автомобиля. Будем считать автомобиль твердым телом, в этом случае автомобиль будет иметь шесть степеней свободы: координаты некоторой фиксированной точки автомобиля A и три угла Крылова — тангаж, крен, курс.

В большинстве случаев автомобиль движется в штатном режиме, и на модель движения разумно наложить следующее неголономное ограничение. Если выбрать точку A в середине оси задних колес автомобиля, то можно считать, что скорость автомобиля направлена перпендикулярно задней оси вдоль его продольной оси. Это позволит, во-первых, оценить более точно угол тангажа автомобиля, во-вторых, оценить угол курса. Причем это единственный способ оценить угол курса при использовании набора сенсоров GPS/ГЛОНАСС, инерциального модуля с низкой или средней точностью.

В этом случае кинематическая модель движения автомобиля будет выглядеть следующим образом:

$$\dot{x} = C v e_x;$$

$$\dot{v} = a;$$

$$\dot{a} = \xi_a;$$

$$\dot{\alpha}_1 = \omega_1 + \sin \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot \omega_2 + \cos \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot \omega_3;$$

$$\dot{\alpha}_2 = \cos \alpha_1 \omega_2 - \sin \alpha_1 \omega_3;$$

$$\dot{\alpha}_3 = \frac{\sin \alpha_1}{\cos \alpha_2} \omega_2 + \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \omega_3;$$

$$\dot{\omega} = \xi_{\omega},$$

где x — вектор положения точки A в локальной системе координат; v — скаляр, равный линейной скорости тела; e_x — единичный вектор, направленный по оси X системы координат, связанной с телом; a — скаляр, равный тангенциальной составляющей линейного ускорения автомобиля; C — матрица преобразования из системы координат, связанной с телом, в локальную систему координат; ω — вектор угловой скорости автомобиля; ξ_a и ξ_{ω} — случайные процессы, характеризующие изменение ускорения и угловой скорости соответственно.

Однако в некоторых случаях подобное неголономное ограничение некорректно, например, автомобиль может уйти в занос, т. е. перейти в нештатный режим. В этом случае разумно оставить неголономное ограничение по вертикальной оси, но временно снять ограничение по поперечной оси, вернув его, как только восстановится штатный режим движения автомобиля. Вторая кинематическая модель получается из первой заменой первого уравнения на уравнение

$$\dot{x} = C(v e_x + v_y e_y)$$

и добавлением пары уравнений:

$$\dot{v}_y = a_y;$$

$$\dot{a}_y = \xi_{a_y},$$

где v_y — вертикальная составляющая скорости автомобиля; a_y — вертикальная составляющая ускорения; e_y — единичный вектор, направленный по оси Y системы координат, связанной с телом; ξ_{a_y} —

случайный процесс, характеризующий изменение вертикальной составляющей угловой скорости.

О том, находится ли автомобиль в заносе и какую модель лучше использовать в данный момент, можно судить, например, по информации от датчиков скорости вращения колеса. Сопоставление скорости вращения колеса, скорости от системы глобального позиционирования и угловой скорости от гироскопов позволяет определить, находится ли колесо в контакте с поверхностью, либо проскальзывает.

Варианты фильтра Калмана для оценки состояния автомобиля

Как уже было сказано, для оценки положения автомобиля мы будем использовать фильтр Калмана. Существует несколько различных модификаций фильтра, позволяющих получить оценку состояния системы с разной точностью, используя различное количество системных ресурсов. В предлагаемой навигационной системе автомобиля будут использоваться три варианта фильтра Калмана:

1) *линеаризованный фильтр Калмана* [8], который наименее требователен к ресурсам, но позволяет получить хорошую оценку только вблизи заданной траектории;

2) *расширенный фильтр Калмана* [9], который позволяет получить более точную оценку состояния системы, но при этом требует больших вычислительных ресурсов;

3) *итерационный расширенный фильтр Калмана* [9], который позволяет получить более точную оценку, чем расширенный фильтр, но требует еще большего количества вычислительных ресурсов.

В качестве примера покажем, как с помощью расширенного фильтра Калмана получить оценку вектора состояния автомобиля для штатного и нештатного режимов. Здесь оценка состояния автомобиля включает два этапа: этап прогноза и этап коррекции.

Программная реализация системы оценки состояния автомобиля

На основе вышеизложенного можно сформулировать следующие требования к программной реализации навигационной системы. Программный комплекс должен позволять:

- 1) принимать и обрабатывать данные сенсоров;
- 2) выдавать по запросу координаты и скорости автомобиля;
- 3) непосредственно в процессе работы переключать модели движения в зависимости от типа движения автомобиля;
- 4) непосредственно в процессе работы переключаться между различными реализациями фильтра Калмана в зависимости от требуемой точности и текущей нагрузки на вычислительный комплекс автомобиля.

Реализация первых двух требований не представляет какой-либо сложности. Рассмотрим более

подробно, как программный комплекс реализует выполнение последних двух требований.

Для описания структуры программного комплекса используем унифицированный язык моделирования UML [10]. UML — это язык графического описания для объектного моделирования в области разработки программного обеспечения. UML обладает большим набором различных диаграмм, позволяющих с разных сторон показать взаимодействие компонентов программного обеспечения. Нам понадобятся два вида диаграмм:

- диаграмма классов, которая демонстрирует классы системы, их атрибуты, методы и взаимосвязи между ними;
- диаграмма последовательности, на которой показано взаимодействие объектов, упорядоченное по времени, с отражением продолжительности обработки и последовательности их проявления.

На диаграмме классов (рис. 2, см. третью сторону обложки) видно, что все классы реализации можно разделить на четыре группы:

1) *классы моделей*, куда относятся модели для обоих возможных режимов движения автомобиля. Все классы группы объединены общим интерфейсным классом IKFModel, позволяющим работать с ними по единому образцу;

2) *классы теорий*, куда относятся классы, представляющие теорию расширенного фильтра Калмана и теорию линеаризованного фильтра. Члены этой группы аналогично объединены общим интерфейсом IKFTheory. Поскольку формулы, используемые в расширенном фильтре Калмана и в итерационном расширенном фильтре Калмана, идентичны, оба метода используют единый класс теории KFTheoryExtended;

3) *классы реализаций*, куда входят классы KFImplementationBase и KFImplementationIterated, которые выполняют функции формирования запросов для классов, относящихся к первым двум группам. Разница между расширенным фильтром Калмана и итерационным расширенным фильтром Калмана состоит в порядке применения формул, что ото-

бражено в разнице классов KFImplementationBase и KFImplementationIterated. Оба класса объединены интерфейсом IKFImplementation;

4) *класс менеджера*, который осуществляет общие функции по созданию объектов и формированию связей между ними.

Таким образом, реализация действующей навигационной системы состоит из объекта класса менеджера и одного объекта из каждой из первых трех групп. Класс менеджера передает им поступающие данные с датчиков навигационной системы для оценки состояния автомобиля. Также, при необходимости, он может подменять объекты одного класса на объекты другого, находящегося в той же группе, для выполнения более точных вычислений либо управления ресурсами системы.

Особенности использования программного комплекса

Рассмотрим, как выглядит процесс оценки состояния системы при получении новых данных. Для этого посмотрим на диаграмму последовательности, написанную также на языке моделирования UML.

На диаграмме (рис. 3, см. третью сторону обложки) приведены не все элементы. Поскольку в системе одновременно задействованы только по одному объекту из каждой группы, то для отображения взаимодействия объектов в процессе оценки состояния системы мы отобразим по одному объекту из каждой группы. На диаграмме показана реализация для расширенного фильтра Калмана.

Объект реализации при получении данных посредством запросов объекту модели подготавливает данные для этапа прогноза, т. е. формирует матрицу частных производных F и функцию движения $f()$. Сформированные данные передаются в объект теории для выполнения этапа прогноза и обновления вектора состояния и матрицы ковариаций. Далее объект реализации аналогично поступает для формирования матрицы H и функции $h()$ и выполнения этапа коррекции. Таким образом, в четыре этапа объект реализации обновляет данные о состоянии системы.

В случае применения итерационного расширенного фильтра Калмана, т. е. использования объекта класса KFImplementationIterated, этап формирования матрицы H и функции $h()$ и выполнения этапа коррекции повторяется несколько раз до достижения требуемой точности.

Теперь рассмотрим диаграмму последовательности при попытке системы высвободить вычислительные ресурсы, т. е. переключении работы навигационной системы с расширенного фильтра Калмана на линеаризованный.

На диаграмме (рис. 4) видно, что при требовании высвободить ресурсы объект менеджера подменяет объект

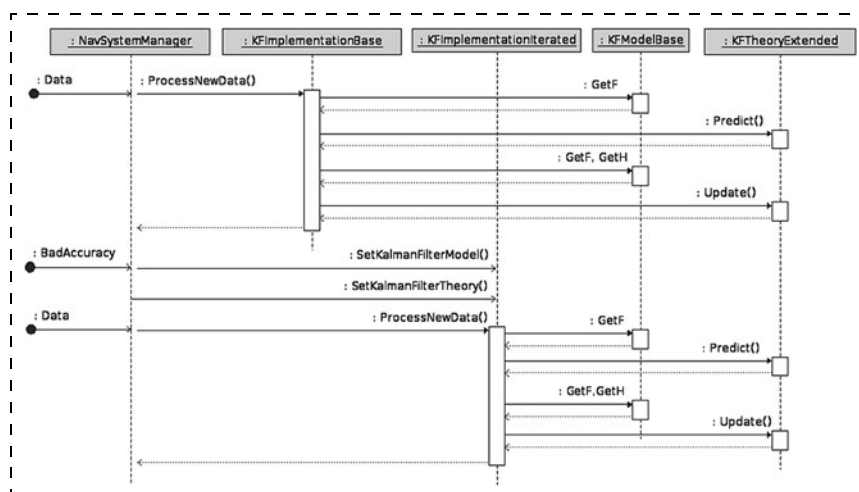


Рис. 4. Диаграмма последовательности высвобождения ресурсов

класса теории. При этом действующий объект реализации продолжает действовать через прежний интерфейс.

При переключении навигационной системы на более точный режим оценивания класс менеджера оставляет прежний объект класса теории (KFTheoryExtended), но подменяет класс реализации с KFImplementationBase на KFImplementationIterated для запуска итерационных вычислений. Это изображено на диаграмме последовательности (рис. 5).

Последней диаграммой последовательности покажем поведение программной реализации навигационной системы при идентификации состояния, при котором автомобиль начал двигаться по нестандартной схеме, т. е. началось проскальзывание в колесах.

На диаграмме (рис. 6) видно, что при поступлении информации об изменении режима движения класс менеджера переключает текущую модель движения с KFModelNormal на KFModelSkid, т. е. временно снимает неголономное ограничение по оси y . При восстановлении обычного режима движения класс менеджера переключает модель обратно.

Заключение

В работе описана программная реализация навигационной системы автомобиля, основанная на использовании различных модификаций фильтра Калмана. Реализация позволяет непосредственно в процессе работы переключаться между линейаризованным, расширенным и итерационным расширенным фильтром Калмана, тем самым динамически регулируя нагрузку на вычислительную систему автомобиля, а также точность оценки положения автомобиля. Кроме этого, реализация позволяет в процессе работы переключать модели движения автомобиля, подстраиваясь под изменение типа реального движения.

Очевидно, что данный метод может быть применен не только к автономному автомобилю, а к любой системе, состояние которой меняется во времени. Для использования метода достаточно выбрать корректные модели для использования в соответствующих вариациях фильтра Калмана.

Список литературы

1. Павловский В. Е., Огольцов В. Н. Динамическая модель механической трансмиссии автомобиля // Спецтехника и связь. 2012. № 5—6. С. 27—36.

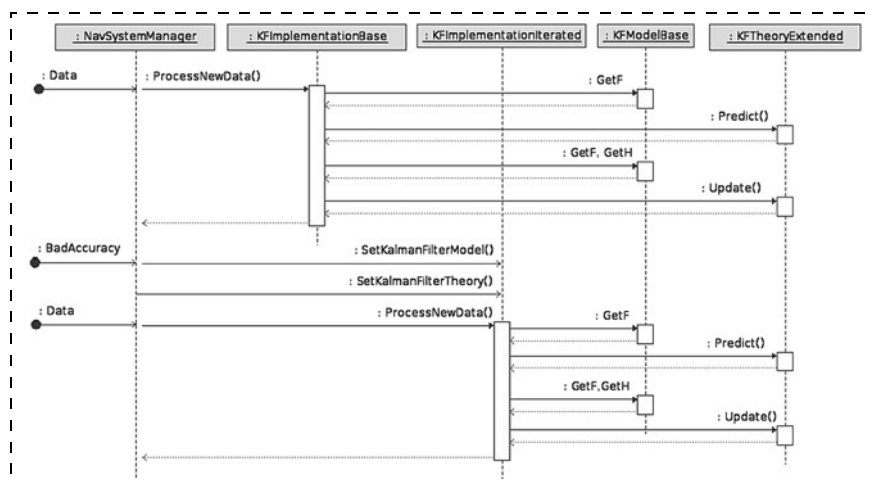


Рис. 5. Диаграмма последовательности переключения на более точный режим оценивания

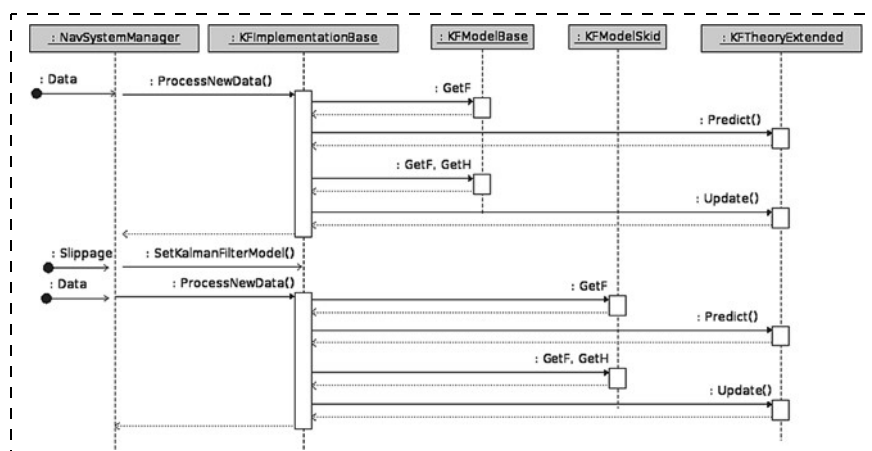


Рис. 6. Диаграмма последовательности переключения режима движения

2. Павловский В. Е., Огольцов В. Н., Огольцов Н. С. Микрокомпьютерная система управления нижнего уровня для автомобиля с механической трансмиссией // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 29—36.

3. Basarke C., Berger C., Rumpe B. Software & Systems Engineering Process and Tools for the Development of Autonomous Driving Intelligence // J. Aerosp. Comput., Inf., Commun. 2007, N. 4. P. 1158—1174.

4. Atul Kanaujia, Tae Eun Choe, Hongli Deng. Complex Events Recognition under Uncertainty in a Sensor Network. 2014. URL: <http://arxiv.org/pdf/1411.0085.pdf>.

5. Kurdej M., Moras J., Cherfaoui V., Bonnifait Ph. Enhancing Mobile Object Classification Using Geo-referenced Maps and Evidential Grids // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 5th Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles, Tokyo, Japan. 2013.

6. Забегаев А. Н., Калинин А. В., Павловский В. В., Павловский В. Е. Объединенная система навигации мобильного робота по маякам и видеоориентирам // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 10. С. 66—70.

7. Kalman R. A new approach to linear Filtering and prediction problems // Transactions ASME Journal of Basic Engineering. 1960. N. 82.

8. Grewal M., Andrews A. Kalman Filtering: theory and practice. NJ, USA: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, 1993.

9. Maybeck P. S. Stochastics Models, Estimation, and Control: Introduction. New York: ACADEMIC PRESS, INC, 1979.

10. OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Infrastructure v2.4.1, 2011. URL: <http://www.omg.org/spec/UML/2.4.1/Infrastructure/PDF>

Adaptive Software Complex for Car Navigation System

This article presents the software complex structure of autonomous vehicle navigation system. Navigation algorithms are based on different linearizations of Kalman filter, including perturbation Kalman filter, extended Kalman filter, iterated extended Kalman filter. Navigation system is a multi-mode and can vary accuracy and system CPU load by switching between modes. Different modes correspond to different implementations of the Kalman filter, as well as different motion models. Various implementations of the Kalman filter are used to select estimation accuracy and current CPU load. Different motion models are used to allow system to react instantly to changes in the environment. All switching happens in real time and do not require additional CPU calculations. The system architecture is described using the Unified Modeling Language (UML) and can be implemented in most object-oriented programming languages.

Keywords: autonomous vehicle, Kalman filter, navigation system, system state estimation

References

1. Pavlovskiy V. E., Ogol'tsov V. N. Dinamicheskaya model' mekhanicheskoy transmissii avtomobilya. *Spetsstekhnika i svyaz'*. 2012. N. 5—6. P. 27—36.
2. Pavlovskiy V. E., Ogol'tsov V. N., Ogol'tsov N. S. Mikro-komp'yuternaya sistema upravleniya nizhnego urovnya dlya avtomobilya s mekhanicheskoy transmissiey. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2014. N. 6. P. 29—36.
3. Basarke C., Berger C., Rumpe B. Software & Systems Engineering Process and Tools for the Development of Autonomous Driving Intelligence. *J. Aerosp. Comput., Inf., Commun.* 2007. N. 4. P. 1158—1174.
4. Atul Kanaujia, Tae Eun Choe, Hongli Deng. Complex Events Recognition under Uncertainty in a Sensor Network. 2014. URL: <http://arxiv.org/pdf/1411.0085.pdf>
5. Kurdej M., Moras J., Cherfaoui V., Bonnifait Ph. Enhancing Mobile Object Classification Using Geo-referenced Maps and Environmental Grids. *EEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 5th Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles, Tokyo, Japan*. 2013.
6. Zabegaev A. N., Kalinichenko A. V., Pavlovskiy V. V., Pavlovskiy V. E. Ob'edinennaya sistema navigatsii mobil'nogo poboda po mayakam i videoopientipam. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2011. N. 10. P. 66—70.
7. Kalman R. A new approach to linear Filtering and prediction problems. *Transactions ASME Journal of Basic Engineering*. 1960. N. 82.
8. Grewal M., Andrews A. Kalman Filtering: theory and practice. NJ, USA: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, 1993.
9. Maybeck P. S. Stochastics Models, Estimation, and Control: Introduction. New York: ACADEMIC PRESS, INC, 1979.
10. OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Infrastructure v2.4.1, 2011. URL: <http://www.omg.Org/spec/UML/2.4.1/Infrastructure/PDF>

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Е. В. Комиссарова.

Сдано в набор 26.11.2014. Подписано в печать 19.01.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН215. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансд солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.