

УДК 519.71

М. В. СОТНИКОВА

(Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)

**ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

*В работе представлены общая постановка задачи и базовые принципы формирования управления подвижными объектами с использованием алгоритмов компьютерного зрения. Обсуждаются основные подходы к синтезу законов управления. В качестве примера рассматривается прикладная задача визуального динамического позиционирования морского судна. Предлагаются два различных подхода к ее решению и отмечаются их ключевые особенности.*

**Введение.** В настоящее время все более широкое распространение получают автономные подвижные объекты, способные решать практически важные задачи без участия человека. К ним относятся автономные подводные и надводные подвижные аппараты, воздушные объекты, наземные колесные или гусеничные мобильные роботы. Автономное функционирование подвижного объекта возможно только при наличии автоматической системы управления, получающей информацию об окружающей среде при помощи датчиков, установленных на борту объекта. При этом многие прикладные задачи невозможно или неэффективно решать без использования визуальной информации с малогабаритных бортовых видеокамер.

В работе рассматривается общая постановка задачи и базовые принципы формирования управления подвижными объектами с использованием систем компьютерного зрения. Кратко изложено существо image-based и position-based подходов, а также гибридная схема (partitioned-based), объединяющая первые два варианта [1-3].

В качестве примера прикладной задачи рассматривается проблема динамического позиционирования морского судна с использованием визуальной информации в контуре обратной связи [4]. Предлагаются два различных подхода к ее решению, обсуждаются их преимущества и недостатки. Первый подход основан на разделении контуров управления изображением и скоростью подвижного объекта, а второй – на использовании нелинейной прогнозирующей модели совместной динамики объекта и изображения. Особенность предлагаемых подходов состоит в том, что в отличие от известных методов, в них учитывается динамика подвижного объекта, ограничивающая свободу перемещения камеры в пространстве.

**Постановка задачи и базовые методы синтеза управления.** Будем считать, что видеокамера не закреплена и может свободно перемещаться в трехмерном пространстве. Пусть  $OX_c Y_c Z_c$  – система координат, связанная с камерой, причем ось  $OZ_c$  является оптической осью, а плоскость  $OX_c Y_c$  параллельна плоскости изображения [5]. В поле зрения камеры в каждый момент времени находится объект наблюдения, имеющий определенные геометрические характеристики и положение в пространстве. Введем вектор  $s \in E^n$ , характеризующий положение объекта относительно камеры. Отметим, что состав компонент этого вектора может существенно отличаться и зависит от выбора того или иного подхода. Рассмотрим математическую модель, характеризующую изменение вектора  $s$  при перемещении камеры:

$$\dot{s} = L(s, a)v_c, \quad (1)$$

где  $v_c \in E^6$  – скорость камеры, которая выступает в качестве управления в рассматриваемой задаче;  $a \in E^k$  – вектор параметров;  $L(s, a)$  – матрица размера  $n \times 6$ , компонентами которой являются нелинейные функции. Пусть  $s^*$  определяет заданное положение объекта относительно камеры. Тогда целью управления является выполнение условия  $e = s - s^* \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow +\infty$ , то есть сведение к нулю ошибки расхождения между желаемым и фактическим положением наблюдаемого объекта относительно камеры.

Базовый принцип формирования закона управления состоит в том, чтобы обеспечить экспоненциальное убывание ошибки [1]:  $\dot{e} = -\lambda e, \lambda > 0$ . Исходя из этого условия и уравнения (1), получим следующее выражение для управления:  $v_c = -\lambda(L^T L)^{-1} L^T e$ .

Рассмотрим три основных подхода к формированию управления, которые основываются на изложенном принципе, но существенно различаются выбором вектора  $s$  и моделью (1).

- 1) *Image-based* подход подразумевает минимизацию нормы ошибки расхождения между фактической проекцией  $s(t)$  объекта наблюдения на плоскость изображения в текущий момент времени и желаемой его проекцией  $s^*$ . Здесь вектор  $s$  содержит характерные признаки наблюдаемого объекта, которые обладают свойствами инвариантности к масштабу, пространственным поворотам, уровню освещенности и повторяемостью, что позволяет отслеживать их в видеопотоке [7]. В качестве таких признаков часто используются координаты  $(x_i, y_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$  особых точек [5] на изображении.
- 2) *Position-based* подход состоит в первоначальной реконструкции трехмерной сцены на основе получаемых изображений [5,6] с последующей минимизацией нормы ошибки расхождения между текущим и желаемым положением в пространстве объекта наблюдения относительно системы координат камеры. В этом случае вектор  $s$  содержит 6 компонент, определяющих пространственное положение системы координат, связанной с наблюдаемым объектом, относительно системы координат камеры.
- 3) *Partitioned-based* является комбинированным подходом, в котором используются данные как трехмерного пространства, так и плоскости изображения. Одним из наиболее известных методов этой группы является 2 1/2 D visual servoing, предложенный в работе [3]. В рамках этого метода вектор  $s$  также содержит 6 компонент: первые три его компоненты определяют проекцию  $(x, y)$  на плоскость изображения некоторой точки  $P$  наблюдаемого объекта и информацию о пространственной координате  $Z$  этой точки, а оставшиеся три компоненты – ориентацию наблюдаемого объекта в пространстве.

Важно отметить, что в рамках рассмотренных подходов отсутствуют дополнительные ограничения в виде уравнений динамики подвижного объекта. Тем не менее, в рамках решения практических задач такие ограничения во многих случаях необходимо учитывать, что требует развития существующих и разработки новых методов синтеза законов управления.

**Визуальное позиционирование морского судна.** Рассмотрим пример прикладной задачи управления подвижным объектом с использованием алгоритмов компьютерного зрения. Математическая модель динамики морского подвижного объекта задана уравнениями [7]:

$$\begin{aligned} M\dot{v} &= -Dv + \tau + \tau_e, \\ \dot{\eta} &= R(\eta)v, \end{aligned} \quad (2)$$

где компоненты вектора  $v = (u \quad v \quad p)^T$  являются проекциями линейной и угловой скорости на оси связанной системы координат; компоненты вектора  $\eta = (x \quad y \quad \psi)^T$  определяют положение центра масс  $(x, y)$  и курсовой угол  $\psi$  по отношению к неподвижной системе координат;  $\tau \in E^3$  – управляющее воздействие,  $\tau_e \in E^3$  – внешние воздействия. Матрицы  $M$  и  $D$  с постоянными элементами положительно определены, причем первая из них является симметрической. Система (2) содержит единственную нелинейность, определяемую ортогональной матрицей  $R(\eta) = R(\psi)$  поворота на угол  $\psi$ .

Будем считать, что на объекте (2) установлена видеочкамера, которая может перемещаться и вращаться только вместе с его корпусом. Пусть  $s \in E^{2n}$  – вектор, характеризующий проекцию объекта наблюдения на плоскость изображения. В качестве компонент этого вектора примем координаты  $(x_i, y_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$  особых точек в плоскости изображения, соответствующих некоторым точкам объекта наблюдения в пространстве. Изменение вектора  $s$  в плоскости изображения связано со скоростью перемещения объекта уравнением:

$$\dot{s} = L(s, Z)v + d_s(t), \quad (3)$$

где  $Z \in E^n$  – вектор, содержащий аппликату  $Z_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  каждой из наблюдаемых точек в системе координат камеры;  $d_s(t)$  – внешнее возмущение. Рассматриваемые совместно уравнения динамики подвижного объекта (2) и изображения (3) составляют полную математическую

модель объекта управления в задаче визуального динамического позиционирования. Будем полагать, что измеряемыми величинами являются векторы  $\eta$ ,  $s$  и  $Z$ . Отметим, что на практике вектор  $Z$  может быть найден с помощью стереозрения [5], либо на основе синтеза соответствующего нелинейного асимптотического наблюдателя.

Целью управления является достижение заданного вектора  $s^*$ , то есть желаемой проекции наблюдаемого объекта в плоскость изображения. Предлагается два возможных подхода к синтезу системы управления с визуальной информацией в контуре обратной связи.

Первый подход основан на разделении контуров управления изображением и скоростью судна [4]. Алгоритм синтеза состоит из двух этапов. На первом этапе, принимая скорость  $v$  подвижного объекта в качестве управляющего воздействия, синтезируется локальная обратная связь  $v = v_d(s, Z, s^*)$  для системы (3), обеспечивающая выполнение условия  $s \rightarrow s^*$  при  $t \rightarrow \infty$ . На втором этапе, считая известной скорость  $v_d$  в каждый момент времени, формируется закон управления подвижным объектом в виде  $\tau = \tau_d(\eta, v_d)$ , целью которого является обеспечение положения равновесия  $v = v_d$  для системы (2). При этом синтез законов управления на обоих этапах осуществляется с использованием многоцелевой структуры [8]. Отметим, что данный подход позволяет декомпозировать исходную нелинейную задачу синтеза и несколько упростить исследование свойств замкнутой системы. Кроме того, он достаточно прост для практической реализации, однако его применение возможно только для объектов с малой инерционностью, обладающих достаточными ресурсами исполнительных органов.

Второй подход базируется на использовании нелинейной прогнозирующей модели [9] и позволяет в рамках оптимизационного подхода учитывать совместную нелинейную динамику подвижного объекта (2) и динамику наблюдаемых точек в плоскости изображения (3). Идеология подхода основана на оптимизации прогнозируемого движения объекта с учетом всей совокупности ограничений на контролируемые и управляющие переменные. Результатом такой оптимизации, повторяющейся с фиксированным шагом по времени, является оптимальное программное управление и соответствующее ему движение на конечном интервале времени – горизонте прогноза. С учетом наличия внешних возмущений, для повышения качества процессов управления формируется дополнительный контур, обеспечивающий стабилизацию заданного программного движения. При этом синтез стабилизирующего управления осуществляется на основе линейной нестационарной модели, представляющей динамику в окрестности контролируемого движения, и многоцелевого подхода.

Необходимо отметить, что недостатком прогнозирующего управления является большая вычислительная трудоемкость соответствующих алгоритмов, обеспечивающих формирование управляющего сигнала в режиме реального времени. В то же время несомненным преимуществом подхода является возможность непосредственного учета динамики объекта и ограничений, что позволяет его использовать для широкого класса подвижных объектов.

**Заключение.** В работе кратко изложены базовые методы синтеза законов управления подвижными объектами с использованием алгоритмов компьютерного зрения, а также рассмотрена задача визуального позиционирования морского судна и предложены подходы к ее решению. Важными вопросами, требующими дальнейшего исследования, являются развитие теоретических результатов по анализу и синтезу систем управления для различных постановок задач, включая движение по визуальной заданной линии и движение в динамически изменяющейся среде с видимыми препятствиями.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках  
научного проекта № 18-37-00463 мол\_а*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Chaumette F., Hutchinson S. Visual Servo Control: Basic Approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2006. Vol. 13. № 4. P. 82-90.
2. Chaumette F., Hutchinson S. Visual Servo Control: Advanced Approaches. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2007. Vol. 14. № 1. P. 109-118.

3. Malis E., Chaumette F., Boudet S. 2 1/2 D Visual Servoing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. 1999. Vol. 15. № 2. P. 238-250.
4. Veremey E.I., Sotnikova M.V. Visual Image Based Dynamical Positioning Using Control Laws with Multipurpose Structure. *IFAC Proceedings Volumes*. 2015. Vol. 48. № 16. P. 184-189.
5. **Szeliski R.** Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 2011. 812 p.
6. **Siciliano B., Khatib O.** (Eds.) Handbook of Robotics. Springer. 2008. 1628 p.
7. Loria A., Fossen T. I. and Panteley E. A Separation Principle for Dynamic Positioning of Ships: Theoretical and Experimental Results. *IEEE Transactions of Control Systems Technology*. 2000. Vol. 8. No. 2. P. 332-343.
8. Веремей Е.И., Сотникова М.В. Многоцелевая структура законов управления морскими подвижными объектами. *Труды: XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014)*. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 3289-3300.
9. **Camacho E. F., Bordons C.** Model Predictive Control. 2nd ed, London, Springer-Verlag. 2004. 405 p.

M.V.Sotnikova (Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg)

### **Problems of navigation and control of moving objects using computer vision**

The paper presents a general statement of the problem and basic principles for the control design of moving objects using computer vision algorithms. The main approaches to the synthesis of control laws are discussed. As an example, the problem of visual dynamic positioning of a marine ship is considered. Two different approaches for control system design are proposed and their key features are discussed.

***Работа выполнена самостоятельно.***