

ВИЗУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ

В.П. Макарычев

К.т.н., Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), с.н.с., Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21, тел.: +7(812)552-07-80, makar@rtc.ru

Аннотация

Предложен новый подход и соответствующие методы визуального управления, когда обратная связь для управления движением робота осуществляется системой технического зрения в виде рассогласования между изображениями, которые определяются с помощью связывающего их непрерывного преобразования.

Для нахождения такого преобразования используются частотные методы, основанные на теории представлений групп и пространственные методы на основе оптических потоков или локальных корреляций областей изображения.

Ключевые слова

Визуальное управление, робот, группа преобразований, оптические потоки, корреляция.

ROBOT MOTION VISUAL CONTROL

V.P. Makarychev

PhD, Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Senior Research Scientist, Tikhoretskiy, 21, Saint-Petersburg, Russia, tel.: +7(812)552-07-80, makar@rtc.ru

Abstract

A new approach and relevant methods of visual control, when feedback for the robot motion control is performed by computer vision system in form of disregistry of images, which are identified by linking them continuous transformation, is proposed.

Frequency-domain methods, based on group representation theory, and three-dimensional methods, based on optical flows and image area local correlation, are used to determine such transformation.

Key words

Visual control, robot, group of transformations, optical flows, correlation.

После появления нетривиальных систем технического зрения (СТЗ) роботов в 1970-х годах естественно возникла идея использовать такую мощную сенсорную систему в контуре обратной связи управления роботом [1, 2]. Общепринятым было использование СТЗ в качестве системы целеуказания. В то же время в ряде работ была предложена идея, получившая название визуального сервоуправления, которая состояла в непосредственном использовании СТЗ в контуре обратной связи, когда получаемое рассогласование между текущим и целевым изображением сцены поступало на вход системы управления робота, минуя стадию вычисления координат [3-7].

Традиционный способ использования изображения состоит в его редукции к набору однородных признаков, отличных от координат робота [8]. В качестве таких признаков часто используются нерегулярные, «особые точки» или «особые линии» на изображении с сильным изменением производных яркости. Вся дальнейшая обработка этой информации перед выдачей управляющих сигналов на приводы робота сводится к обработке этих признаков.

Ниже предлагается новый подход, основанный на использовании вместо отдельных признаков изображения непосредственно самого изображения или его части.

При визуальном управлении основным инструментом исследования является отображение

$g = \Phi(x)$ пространства абсолютных декартовых координат x в пространство видеопризнаков g . Для его получения необходимо знать матрицу размерности 2×4 модели камеры M , осуществляющей преобразование в проективных координатах трёхмерного пространства среды $x = (x_1, x_2, x_3, 1)^T \in R^4$ в двумерное изображение $I = (i_1, i_2, 1) \in R^3$ [8]:

$$I = Mx. \quad (1)$$

Эту матрицу удобно разбить на две основные составляющие: внутренняя модель камеры, зависящая от параметров камеры, и внешняя модель камеры, определяемая положением камеры в пространстве R^3 .

Основная идея предлагаемого метода управления по изображению состоит в возможности найти непрерывное преобразование, связывающее два изображения - текущее и целевое, желаемое. Для этого можно использовать разные методы - локальные корреляции, оптические потоки, наконец, наиболее мощный - частотный метод на основе теории представления групп [9-13].

В общем случае такое преобразование является проективным преобразованием плоскости R^2 , но предполагая принадлежность основных элементов сцены одной плоскости (что имеет место, например, при намного больших расстояниях до объектов сце-

ны по сравнению с расстояниями между объектами), можно ограничиться аффинным преобразованием $I \in R^2$.

Пусть в результате обработки изображения получается преобразование Θ (движения, аффинное, проективное), связывающее изображения I_1 и I_2 - целевое и текущее $I_1 = I(t), I_2 = I_3(t)$, соответственно, $I(t) = \Theta I_3(t)$. (2)

Конечно, уравнение (2) должно учитывать уравнение модели камеры (1), но при таком подходе не требуется восстановления структуры сцены, т.е. положения объектов в пространстве R^3 .

В качестве целевого изображения могут выступать как изображение в целевом положении робота, так и изображения, соответствующие промежуточным положениям в процессе движения, что можно считать визуальной программной траекторией $I_3(t)$, и находят своё выражение в зависимости от времени t . Цель управления робота состоит в максимальном приближении получаемого с подвижной камеры видеоряда к запланированному на визуальной программной траектории.

При классическом визуальном сервоуправлении от указанной выше функции преобразования положения манипулятора или мобильного робота в признаки $g = \Phi(x)$ переходят дифференцированием к

$$v = K_{\Theta}(I(t) - I_3(t)) = K_{\Theta}(\Theta I_3(t) - I_3(t)) = K_{\Theta}(\Theta - E)I_3(t) = K_{\Theta}\Delta\Theta I_3(t). \quad (7)$$

Таким образом, рассогласование изображений, т.е. изображение, полученное вычитанием двух изображений, состоящее из $n_1 \times n_2$ пикселей, должно быть преобразовано в вектор управлений размерности n - число управляемых координат. Следовательно, необходимо решить проблему преобразования матрицы размерности $n_1 \times n_2$ в вектор управления размерности n .

Заметим, что аналогичные проблемы встают и в классической задаче преобразования $z = F(q), z = (x, w)^T \in R^3 \times R^3 = R^6, q \in Q^n$ абсолютных координат в относительные, и в случае классического визуального сервоуправления при преобразовании абсолютных $z = R^6$ или

Якобиану J , связывая скорость робота со скоростью изменения вектора признаков:

$$\dot{g} = \left\{ \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} \right\} \dot{x} = J(x)\dot{x}, \quad (3)$$

$$\dot{x} = J^{-1}(x)\dot{g}.$$

Отсюда можем получить алгоритм управления, например, в виде задания скорости:

$$v_{r1}(t) = \dot{x}(t) = KJ^{-1}(x)(g(t) - g_3(t)), \quad (4)$$

где g_3 - вектор признаков заданного целевого изображения.

Далее стандартным способом, решая обратную задачу кинематики для скоростей, можно перейти от абсолютных координат робота к его относительным координатам q приводов:

$$\dot{q} = \left\{ \frac{\partial F(q)}{\partial x} \right\} \dot{x} = J_q(q)\dot{x}, \quad (5)$$

$$\dot{x} = J_q^{-1}(q)\dot{q}.$$

И из уравнений (2), (3) получается аналогичный алгоритм управления для относительных координат:

$$v_{q1}(t) = \dot{q}(t) = K_q J_q^{-1} J^{-1}(x)(g(t) - g_3(t)). \quad (6)$$

Предлагается метод визуального управления по положению на основе преобразования изображений (2) аналогичный классическим алгоритмам (4), (6):

относительных $q \in Q^n$ координат робота в пространство признаков $g = (g_1, \dots, g_N)^T \in G$:

$$g = \Phi(x) = \Phi(F(q)). \quad (8)$$

Во всех ситуациях в решении участвует псевдообратная матрица Якобиана.

Пусть хотя бы для одного изображения I известны отвечающие ему координаты робота $z = F(q) \in R^6$ или $q \in Q^n$. Тогда можно и для любого другого изображения \tilde{I} найти соответствующее положение робота $\tilde{r} \in R^6$.

Обобщением алгоритма (7) будет моментное управление на основе обратных задач динамики [14-17]:

$$M = A(q, \xi)[\ddot{q}_p + \Gamma_1(\dot{q} - \dot{q}_p) + \Gamma_0(q - q_p)] + b(q, \dot{q}, \xi), \quad (9)$$

где Γ_1 и Γ_2 - 6×6 -матрицы коэффициентов усиления в каналах обратной связи по динамической ошибке $e = q_p(t) - q(t)$ и по скорости её изменения $\dot{e} = \dot{q}_p(t) - \dot{q}(t)$.

Используемые в алгоритме величины получаются с помощью следующих процедур:

- $q_p(t), \dot{q}_p(t), \ddot{q}_p(t)$ - в результате построения заданной траектории;
- $q(t), \dot{q}(t)$ - с датчиков приводов;
- $A(q, \xi), b(q, \dot{q}, \xi)$ - в результате вычисления коэффициентов уравнений Лагранжа;
- ξ - вектор конструктивных параметров робота, приведенный к форме (в виде матриц инерции),

необходимой для расчета коэффициентов уравнений Лагранжа;

– Γ_1, Γ_0 – матрицы диагональных коэффициентов усиления $\Gamma_1 = \text{diag}(\gamma_{1ii})_{i=1}^6$,

$\Gamma_0 = \text{diag}(\gamma_{0ii})_{i=1}^6$, выбираемые обычно из условия обеспечения устойчивости и условия

$\Gamma_1 \geq 2\sqrt{\Gamma_0}$ апериодичности переходного процесса.

Этот моментный алгоритм также можно обобщить до адаптивного алгоритма с помощью прямой идентификации параметров или градиентного алгоритма [15, 16].

Последующий переход к традиционным алгоритмам управления можно осуществить с помощью гармонической линеаризации существенно нелинейного привода, а в цифровых приводах возможно чисто моментное или векторное управление, когда входом привода является не только программная координата, но и ограничение скорости и момента [17].

Предложенный метод математически моделировался для движущегося по коридору мобильного робота. Исходными данными являлись две последовательности видеок кадров, полученные при движении реального робота. Первая последовательность задавала визуальную программную траекторию, а вторая использовалась для имитации реального движения робота. В качестве первого реального кадра выбирался первый кадр второй последовательности. Каждый следующий реальный кадр имитировался из предыдущего с помощью его геометрического преобразования, получаемого с учётом моделирования перемещения робота. Кроме того, для сохранения устойчивости процесса использовалась вторая последовательность видеок кадров. На каждом шаге выработки управлений по скорости на приводы робота сравнивались программное и реальное изображения и формировался сигнал согласно алгоритму (7).

На рисунках 1 и 2 приведены примеры двух кадров в процессе движения. Первый кадр взят из базы данных предыдущих движений, а второй получен при текущем движении робота. На изображениях выделены особые точки, по которым было найдено аффинное преобразование Θ , совмещающее изображение. Далее, согласно алгоритму (7) были выработаны управления на приводы робота в виде их скоростей.

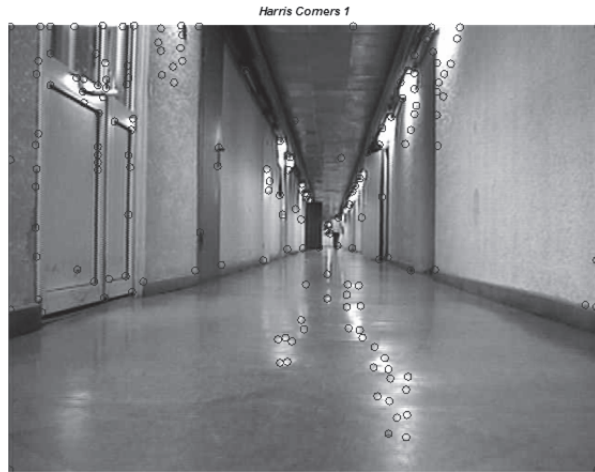


Рисунок 1 - Выделенные особые точки на первом изображении

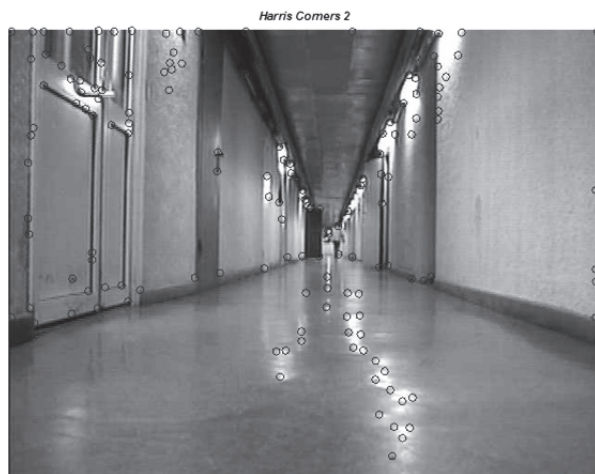


Рисунок 2 - Выделенные особые точки на втором изображении

Заключение

В работе предложен новый метод визуального управления, основанный на использовании всего изображения внешней среды или его элементов в качестве сигнала управляющей обратной связи. Описаны идея метода, основные формулы и математический эксперимент по моделированию такого управления движением мобильного робота.

Литература

1. Paul R.C. Modeling, trajectory calculation, and servoing of a computer-controlled arm // Stanford A. I. Lab. - Memo 177, Nov. - 1972.
2. Horn B. Robot vision. MIT Press // Cambridge, MA. - 1986.
3. Longuet-Higgins H.C., Prazdny K. «The Interpretation of a Moving Retinal Image» // Proceeding of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, Vol. 208, No. 1173 (Jun. 17, 1980). – P. 385-397.
4. Corke P.I. and Paul R.P. Video-rate visual servoing for robot. In V. Hayward and O. Khatib, editors // Experimental Robotics 1, Springer Verlag. - 1989. - P. 429-451.
5. Manipulator control with image-based visual servo // K. Hashimoto., T. Kimoto, T. Ebine, and H. Kimura // Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (April 1991). - P. 2267-2271.
6. Bishop B., Hutchinson S., and Spong M. Camera modeling for visual servo control applications // Mathematical and Computer Modelling, vol. 4, no. 5-6. - 1996. - P. 79-102.
7. Nasisi O., Carelli R. Adaptive servo visual robot control // In Robotics and Autonomous Systems, 43 (2003). – P. 51-78.
8. Shapiro L.G., Stockman G.G. // Computer vision. Pearson Education, Inc. Prentice Hall. - 2001. - 752 p.
9. Путятин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. – Москва : Машиностроение. - 1990, - 320 с.

10. Макарычев В.П. Оптические потоки и методы теории представления групп Ли в задачах обработки изображений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Основной выпуск. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, №3(59), 2008. - С. 30-37.

11. Makarychev V.P. Application of Optical Flow and Methods of Group Lee Representation in Problems of Detecting of Movements and Pattern Detection on the Images // Solid State Phenomena. Mechatronic Systems and Materials III. V. 145 (2008). - P. 582–587.

12. Макарычев В.П. Метод локальных корреляций для обнаружения и распознавания аффинно-инвариантных объектов на изображениях // Сборник материалов Пятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ. - 2010. - С. 85-89.

13. Макарычев В.П. Нахождение аффинно-инвариантных изображений для задач навигации, распознавания и диагностики автономных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. - 2014. - Т.2, № 1. – С. 75-78.

14. Крутько П.Д., Управление исполнительными системами роботов. – Москва : Наука. - 1991.- 336 с. (Научные основы робототехники).

15. Тимофеев А.В., Экало Ю.В. Устойчивость и стабилизация программных движений робота-манипулятора // Автоматика и телемеханика. - 1976. - № 10.- С. 149-156.

16. Динамика управления роботами // Козлов В.В., Макарычев В.П., Тимофеев А.В., Юревич Е.И.; под ред. Юревича Е.И. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы. - 1984. - 336 с.

17. Макарычев В.П., Юревич Е.И. Супервизорное управление космическими манипуляторами. – Санкт-Петербург : Астрион. - 2005. – 108 с.

Информация

Новинки книжного рынка



Эшби, У. Росс. Введение в кибернетику. / Пер. с англ. – М. : ЛЕНАНД, 2015. – 432 с.

Книга написана известным английским специалистом в области кибернетики. Изложены основные понятия кибернетики, возможности применения идей в различных областях человеческой деятельности. Изложение сопровождается большим числом примеров. Книга рассчитана на специалистов в области информатики, прикладной математики и на представителей других наук, интересующихся кибернетикой и желающих применять ее методы в своей специальности.