

нахилом 0 і –20 дБ/дек, що чергуються. Змінюючи кількість ділянок на декаді, можна змінювати точність наближення передатної функції до ідеальної. Тобто можна управляти точністю моделювання флікер-шуму.

Отже, використовуючи запропоновану передатну функцію, можна в системах комп'ютерного моделювання на основі джерела білого шуму створити джерело флікер-шуму.

1. Бучма І., Вжуцак М. *Моделі математичного подання флікер-шуму // Комп'ютерні технології друкарства.* – 2004. – №11. – С. 115–118. 2. Гутников В.С. *Интегральная электроника в измерительных устройствах.* – Л., 1980. 3.Скрипник Ю.О., Яненко О.П. *Шляхи зниження флуктуаційного порогу чутливості вимірювачів слабких сигналів // Автоматика, вимірювання та керування.* – 2001. – №420. –С.20–27. 4. *Теория автоматического управления. В 2-х ч. Ч.1. Теория линейных систем автоматического управления/ Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А.Воронова и др.; Под ред. А.А. Воронова.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1986. 5. Орнатский П.П. *Теоретические основы информационно-измерительной техники.* – К., 1976.

УДК 621.313

Ming-June Tsai, Chuan-Cheng Hung

Государственный университет Cheng-Kung, Тайнань, Тайвань,
лаборатория робототехники и автоматизации, отдел механической разработки

СИСТЕМА И ПОГРЕШНОСТИ ТРЕХМЕРНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

© *Ming-June Tsai, Chuan-Cheng Hung, 2005*

Рассмотрен метод оценки погрешности систем трехмерного 3-D видения. Сформулирована математическая модель разрешения пространственной области системы 3-D активного видения.

This paper is addressed a method for fast evaluation approach of correspondence uncertainty in 3-D vision metrology systems. The mathematic model of spatial resolution measurement area of a 3-D active vision system is formulated.

1. Введение

В современной практике 3-D видение играет важную роль в разнообразных областях, в том числе для копирования, распознавания объектов автоматического оптического осмотра (АОО), медицины, компьютерной графики и мультипликации [1]. Измерение профиля поверхности с микронным уровнем точности становится важным в контроле качества изделия. Компоненты видения типа камер с зарядовой связью (CCD) и цифровых процессоров освещения (DLP) применяются в последние годы в передовых полупроводниковых технологиях. Это обеспечивает разработку систем видения с низкой стоимостью и высокой гибкостью [2]. Кроме того, прибор с зарядовой связью обеспечивает измерения в миллионах точек в течение нескольких секунд. Для 3-D видения используют активные и пассивные системы. Обычно активная система состоит из проектора и одной или двух камер. Проектор задает интерференционные картины на поверхности объекта, а камера регистрирует искаженное изображение для дальнейшей обработки. Большинство систем, основанных на структурированном световом проектировании, были разработаны в течение последнего десятилетия. Авторы [3] разработали 3-D оптическую профилометрическую систему на базе коммерческого проектора и (CCD) камеры. Для простоты проектор и камера компланарной системы размещены на одной высоте. Калибруются только два параметра системы, влияние которых на погрешность измерения и было исследовано. В [4] разработана общая конфигурация системы 3-D видения. Авторы [5] разработали систему точного контроля поверхности для сканирования профиля маленьких объектов.

Ассоциированный метод, использующий внешние и собственные параметры, обеспечивает погрешность калибровки $\leq 10 \mu m$. Характеристики 3-D видения определяются такими параметрами: – размещением камер (положением и ориентацией); – разрешением линз и пикселей; – рабочим пространством (расстоянием от камеры до объекта и областью видимости). Составляющая погрешности калибровки системы входит в погрешность каждого измерения. Для достижения высокой точности измерений необходимо настроить систему видения в конфигурации, которая обеспечивает минимальные погрешности. Важность оценки погрешности была признана известными работами. Kamgar-Parsis разработали математический аппарат для вычисления средней погрешности квантования [6]. Ян и Ciarallo изучили влияние погрешности одно- и двухразмерного квантования на статистические измерения [7]. Для анализа погрешности измерений координат Che и др. использовали подход, основанный на принужденной оптимизации [8]. Они определили, что погрешность точки координат не гомогенна в области измерений. Lazzari и Iuculano [9] предложили математическую модель, которая позволяет оценку погрешности измерений идентифицировать с общими метрологическими характеристиками системы 3-D видения.

Предлагается метод оценки погрешности для систем точного контроля поверхности. Метод оценки обеспечивает определение конфигурации системы. Погрешности измерений изучены качественно и количественно в пределах области контроля. Для вычисления верхнего предела погрешностей измерений определен индекс качества с учетом шума. Выполнена картография контура погрешностей. Результаты использованы для оценки погрешностей контроля V-образной выемки.

2. Моделирование системы

Активная система видения состоит из устройства проектирования и устройства изображения (рис. 1). $O_p(X_p, Z_p)$ представляет оптический центр проектора, который используется для активного проектирования интерференционных картин на объекте. $O_c(X_c, Z_c)$ представляет собой оптический центр камеры, которая регистрирует искаженные объекты картины. Чип проектора и датчик камеры – это две пространственные матрицы, которые составлены из $N_u \times N_v$ и $M_u \times M_v$ пикселей. Масштабные факторы интерполяции в обоих направлениях введены для упрощения системы измерения. Поэтому проектор может быть представлен размерным устройством, имеющим N_u пикселей, а камера – устройством, имеющим M_u пикселей, соответственно.

В системе 3-D измерения точки поверхности объекта определяются парами (N_u, M_u) соответственно. Разрешение системы тесно связано с пространственным расположением проектора и камеры. Согласно вышеизложенному, разрешение в области измерения (МА) неоднородно. На рис. 1 размеры ячейки проектора и камеры обозначены как Δ_p и Δ_c . Эффективная длина фокусного расстояния проектора и камеры составляет f_p и f_c . Углы θ_p и θ_c – углы наклона проектора и камеры. Предположим, что свет, испускаемый из точки $Q_p(X_n, Z_n)$ n -м пикселем центра чипа проектора, формируется соединением Q_p и O_p . Пиксельный луч с углом наклона θ_n достигает объекта в точке ${}^W P$. L'_p является пиксельным лучом, отраженным от точки ${}^W P$ на объекте к O_c . Луч под углом θ_m к центральной линии захватывается камерой. Изображение $Q_c(X_m, Z_m)$ расположено на m -м пикселе камеры. Q_p и Q_c формирует пару лучей, которая используется для получения координаты ${}^W P$. Поэтому система может трактоваться как стереокамерная система, в которой проектор проецирует интерференционные картины на объекте.

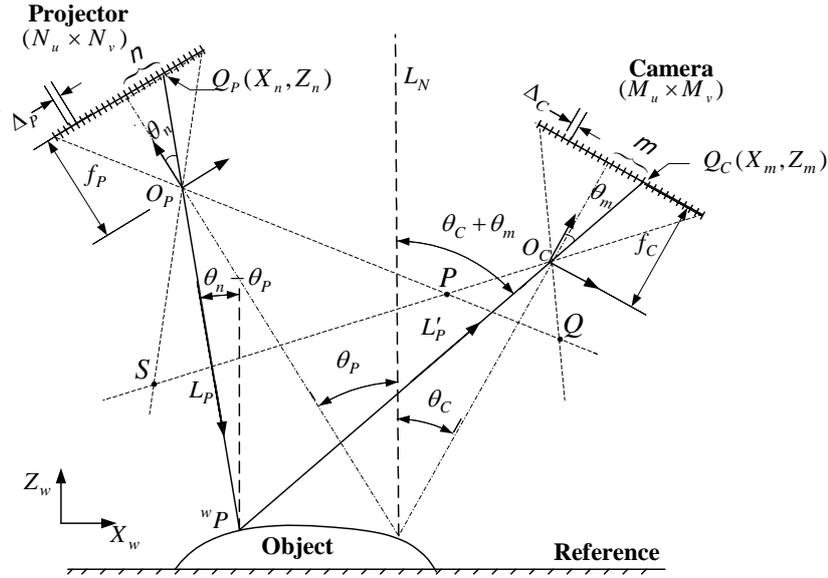


Рис. 1. Оптическая схема системы 3-D активного видения

На рис. 1 координаты Q_C и Q_P могут быть выражены так:

$$\begin{cases} X_m = X_C + f_C \sin \theta_C + m \Delta_C \cos \theta_C \\ Z_m = Z_C + f_C \cos \theta_C - m \Delta_C \sin \theta_C \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_n = X_P - f_P \sin \theta_P + n \Delta_P \cos \theta_P \\ Z_n = Z_P + f_P \cos \theta_P + n \Delta_P \sin \theta_P \end{cases} \quad (2)$$

Луч L_P может быть определен из выражения

$$\frac{Z_n - Z_P}{X_n - X_P} = \frac{1}{\Phi_P} \quad (3)$$

где Φ_P обозначает инверсию наклона L_P , которая может быть выражена как

$$\Phi_P = \frac{-f_P \sin \theta_P + n \Delta_P \cos \theta_P}{f_P \cos \theta_P + n \Delta_P \sin \theta_P} = \tan(\theta_n - \theta_P), \quad \tan \theta_n = \frac{n \Delta_P}{f_P} \quad (4)$$

Наклон луча L_P в (4) является функцией f_P , θ_P , n , Δ_P , и θ_n .

Аналогично, регистрируемый камерой световой луч может быть сформулирован как

$$\frac{Z_m - Z_C}{X_m - X_C} = \frac{1}{\Phi_C} \quad (5)$$

где Φ_C обозначает инверсию наклона L'_P

$$\Phi_C = \frac{f_C \sin \theta_C + m \Delta_C \cos \theta_C}{f_C \cos \theta_C - m \Delta_C \sin \theta_C} = \tan(\theta_C + \theta_m), \quad \tan \theta_m = \frac{m \Delta_C}{f_C} \quad (6)$$

Из уравнений (3) и (5) координата ${}^w P$ может быть выражена как:

$$\begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{\Phi_C - \Phi_P} \begin{bmatrix} -\Phi_P X_C + \Phi_C X_P + \Phi_C \Phi_P (Z_C - Z_P) \\ -(X_C - X_P) + \Phi_C Z_C - \Phi_P Z_P \end{bmatrix} \quad (7)$$

После определения конфигурации системы измерения и изготовления проектора и камеры установлены переменные типа $f_P, f_C, \Delta_P, \Delta_C, \theta_P$ и θ_C . Поэтому положение каждой выбранной точки на поверхности (X, Z) является функцией соответствия пары (m, n) , описанного уравнением (7).

Чтобы оценить работу системы измерения, необходимо исследовать влияние координат (X, Z) на погрешность соответствия точек. При малых вызванных шумами вариациях (m, n) погрешность (X, Z) определяется выражением:

$$\begin{cases} dX = \frac{\partial X}{\partial m} \delta m + \frac{\partial X}{\partial n} \delta n \\ dZ = \frac{\partial Z}{\partial m} \delta m + \frac{\partial Z}{\partial n} \delta n \end{cases} \quad (8)$$

После некоторых вычислений отношения между нарушенным положением $d\mathbf{R} = [dX \ dZ]^T$ и возмущенным $d\mathbf{II} = [\delta m \ \delta n]^T$ могут быть получены в матричной форме:

$$d\mathbf{R} = \mathbf{A}d\mathbf{II} \quad (9)$$

где

$$\mathbf{A} = \frac{1}{(\Phi_C - \Phi_P)^2} \begin{bmatrix} \Phi_P \Psi_m & \Phi_C \Psi_n \\ \Psi_m & \Psi_n \end{bmatrix}, \quad (10)$$

Ψ_m, Ψ_n описаны выражением (11) и дифференцирование наклонной инверсии Φ_P и Φ_C описаны выражением (12)

$$\begin{cases} \Psi_m = \frac{\partial \Phi_C}{\partial m} [(X_C - X_P) - \Phi_P(Z_C - Z_P)] \\ \Psi_n = \frac{\partial \Phi_P}{\partial n} [-(X_C - X_P) + \Phi_C(Z_C - Z_P)] \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi_C}{\partial m} = \frac{1 + \cos(2\theta_m)}{1 + \cos[2(\theta_C + \theta_m)]} \left(\frac{\Delta_C}{f_C} \right) \\ \frac{\partial \Phi_P}{\partial n} = \frac{1 + \cos 2\theta_n}{1 + \cos[2(\theta_n - \theta_P)]} \left(\frac{\Delta_P}{f_P} \right) \end{cases} \quad (12)$$

Следовательно, для установленной системы измерения пространственный градиент $d\mathbf{R}$ каждого положения в пределах \mathbf{MA} может быть определен по параметрам системы, характеристикам ее оптических составляющих и относительным соответствующим парам (m, n) .

3. Оценка погрешности измерения

При использовании метода триангуляции ключевой процедурой в 3-D отображении является определение правильного соответствия, то есть нахождение соответствующих пар пикселей стереоизображения. В нашей “камере-проекторе” модели соответствие для каждого пикселя выражено (m, n) . Точность соответствия ограничена погрешностью соответствующего индекса δm or δn , который вводится в полную погрешность Λ в определении точки на поверхности объекта

$$\Lambda = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Z)^2} \quad (13)$$

Погрешность может быть оценена так:

$$(\Delta X)^2 + (\Delta Z)^2 = d\mathbf{R}^T \cdot d\mathbf{R} = d\mathbf{II}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) d\mathbf{II} \quad (14)$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial X}{\partial m}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial m}\right)^2 & \frac{\partial X}{\partial m} \frac{\partial X}{\partial n} + \frac{\partial Z}{\partial m} \frac{\partial Z}{\partial n} \\ \frac{\partial X}{\partial m} \frac{\partial X}{\partial n} + \frac{\partial Z}{\partial m} \frac{\partial Z}{\partial n} & \left(\frac{\partial X}{\partial n}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial n}\right)^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Так как все диагональные элементы симметрической матрицы $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ положительны, ее детерминант $|\mathbf{A}^T \mathbf{A}|$ всегда положительный

$$|\mathbf{A}^T \mathbf{A}| = \left(\frac{\partial X}{\partial m} \frac{\partial Z}{\partial n} - \frac{\partial X}{\partial n} \frac{\partial Z}{\partial m} \right)^2 = |\mathbf{A}|^2 > 0 \quad (16)$$

Матрица $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ является определенно-положительной, поэтому такое неравенство выдерживается для всех комбинаций $d\mathbf{И}$

$$\lambda_{\max} \|d\mathbf{И}\|^2 \geq d\mathbf{И}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{A}) d\mathbf{И} \geq \lambda_{\min} \|d\mathbf{И}\|^2 \quad (17)$$

или

$$\sqrt{\lambda_{\max}} \|d\mathbf{И}\| \geq \Lambda \geq \sqrt{\lambda_{\min}} \|d\mathbf{И}\| \quad (18)$$

где λ_{\max} и λ_{\min} – характеристическое число матрицы $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$. Матрица \mathbf{A} определена для каждой конфигурации системы 3-D отображения. Характеристические числа λ_{\max} и λ_{\min} для каждой точки измерения могут быть рассчитаны и определен диапазон погрешностей.

Элементы матрицы \mathbf{A} непостоянны в пределах \mathbf{MA} , поэтому нецелесообразно вычислять матрицу для каждой точки \mathbf{MA} . Контуры постоянных погрешностей в \mathbf{MA} используют для оценки погрешности измерений. При непрерывности функции погрешности Λ определяют при $\Lambda = \text{const}$.

В этом случае индекс качества E_{rms} определяется среднеквадратичной погрешностью

$$E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} (\Lambda_i)^2}, \quad (19)$$

и может использоваться для оценки погрешностей 3-D видения. N_S является общим количеством точек измерения на поверхности объекта. Индекс качества не может быть рассчитан для какой-либо заданной или стандартной поверхности. Поэтому мы можем использовать следующую процедуру для оценки диапазона индекса качества для определенной \mathbf{MA} .

Индекс качества в пределах контура остается постоянным. Если поверхность объекта, представленная кривой в \mathbf{MA} , лежит между двумя контурами с погрешностями Λ_1 и Λ_2 соответственно, то значение индекса качества должно быть внутри этих двух пределов

$$\Lambda_2 \geq E_{rms} \geq \Lambda_1. \quad (20)$$

4. Экспериментальные результаты и дискуссия

Предложенный метод экспериментально проверен на разработанной системе точного 3-D контроля поверхности. Система состоит из пяти главных компонентов (рис. 2): (1) Hayashi LA-150UE – галогенного источника света с мощностью

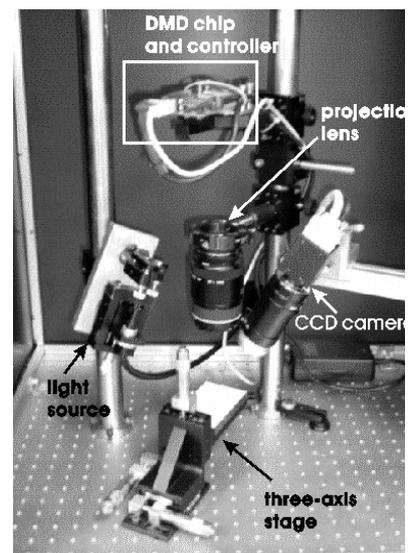


Рис. 2. Созданная система точного контроля поверхности

150 W; (2) Texas Instrument DMD™ Discovery 1000 – проекционного аппарата с разрешением 1024×768 и размером ячейки $16 \mu m^2$; (3) трехкоординатной платформы с разрешением $1 \mu m$ по осям X,Y и $0.5 \mu m$ -разрешением по оси Z; (4) Pulnix TM-1320-15CL CCD – камеры с разрешением 1300×1030 и размером ячейки $6.7 \mu m^2$; (5) персонального компьютера Pentium 4 1.5GHZ CPU с камерой Метеор и PCI платой захвата изображения. В процессе измерений интерференционная картина проектируется на поверхность объекта устройством проектирования, которое составлено из чипа DMD™ и линзы.

Картина, которая должна быть спроектирована, получена в соответствии с программой и передана диспетчеру чипа DMD™ универсальной последовательной шиной (USB). Для получения картины с различными уровнями интенсивности используется модуляция ширины импульса (PWM). Интенсивность управляется продолжительностью включения каждого пикселя DMD™. Линза отображает картину чипа DMD™ на поверхности объекта. Контролируемый объект помещен на платформе с трехосным позиционированием. Деформированная на поверхности объекта интерференционная картина регистрируется камерой с зарядовой связью (CCD). В камере установлена телецентрическая линза для увеличения глубины области (DOF). Полученные камерой изображения передаются на компьютер для дальнейшей обработки.

В табл. 1 и 2 представлены характеристики системы и основных ее элементов. Диапазон измерений системы может быть определен по ее параметрам. Характеристики камеры с зарядовой связью (CCD) и чипа DMD определяют границы **МА**. Из-за обратимости хода лучей света устройство проектирования может рассматриваться как другая камера с зарядовой связью (CCD) и поэтому любые помещенные в пределах **МА** объекты фактически наблюдаются двумя камерами. Фокальные диапазоны оптических линз практически ограничены несколькими миллиметрами. Изображение картин размывается для смещенного от оптической оси объекта и это вводит помехи в измерения. Следовательно, контроль должен выполняться в треугольнике ΔPQS (**МА**), потому что эти участки ближе к оптическим осям O_C и O_P (рис. 3). В этой области система имеет более высокую чувствительность, чем в других областях, и, следовательно, более высокое разрешение.

Таблица 1

Характеристики системы

Характеристики	Значения
Оптический центр камеры O_C , <i>mm</i>	(43, 74)
Оптический центр проектора O_P , <i>mm</i>	(-5, 77)
Размеры пикселя камеры Δ_C , μm	6.7
Размеры пикселя проектора Δ_P , μm	16
Количество пикселей проектора N_u , шт	1024
Количество пикселей камеры M_u , шт	1300
Угол зрения камеры, °	30

Уравнение (18) может быть использовано для оценки погрешностей в пределах **МА**. Рис.3 показывает **МА** (ΔPQS) – зону минимальных погрешностей. Как было уже отмечено, вершина *P* имеет наименьшую погрешность $14.6 \mu m$. По мере удаления от *P* погрешность увеличивается и достигает максимума $23.5 \mu m$ в вершине *S*. Изменение погрешностей в пределах **МА** достигает 37.87 %, указывая на то, что результаты измерений неоднородны. Для уменьшения погрешностей, объект должен быть помещен ближе к вершине *P*.

Характеристики камеры с зарядовой связью (CCD) и устройства проектирования

Характеристики	Значения	
	Устройство проектирования	Камера прибора с зарядовой связью (CCD)
Матрица вращения, R	$\begin{bmatrix} -0.99696 & -0.01997 & 0.07530 \\ 0.01537 & -0.97544 & -0.03913 \\ 0.07603 & -0.03877 & 0.99635 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.88016 & -0.00834 & -0.47459 \\ 0.00652 & -0.97861 & -0.00879 \\ -0.47449 & -0.01107 & 0.88018 \end{bmatrix}$
Вектор перевода, T	$[-0.00236 \ 0.00361 \ -0.00594]^T$	$[0.00592 \ 0.00183 \ -0.13753]^T$
Эффективная центральная длина, мм	88	98.92
Фактор искажения, κ	$3.76e-8$	$1.20e-8$
Центр изображения (пиксель)	(28.93, 479.42)	(831.0, 420.2)

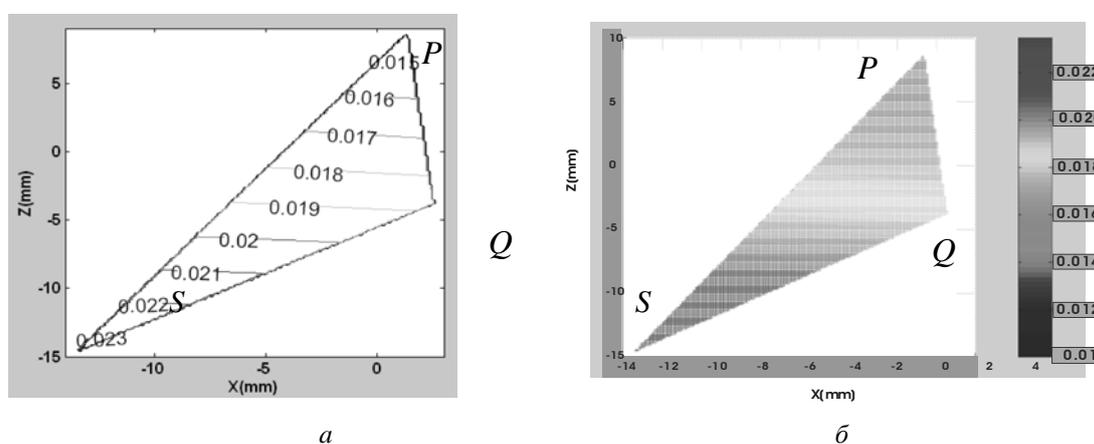


Рис. 3. Погрешности в пределах области контроля (МА):

a – контурная линия погрешностей системы; *б* – цветовая картография погрешностей системы

5. Выводы

Таким образом, разработана система точного контроля поверхностей и метод оценки погрешностей 3-D видения. Метод предназначен для удобной оценки погрешностей 3-D контроля поверхности объекта с помощью предварительно калиброванных систем. Новый метод оценки использует характеристики системы и внешние параметры 3-D видения. Для оценки работы системы используется также и карта погрешностей. Экспериментально доказано, что результаты измерений неоднородны в **МА**. Для уменьшения погрешностей измерений объект необходимо размещать в **МА** ближе к вершине **P**. Однако при этом уменьшается диапазон измерений, поэтому вопрос диапазона и погрешности измерений должен рассматриваться компромиссно.

1. Hung C.C., Lu Y.C., and Yang W.H. A Survey on Optical 3-D Measurement Methods for Micro-Components, *The Seventh International Conference on Automation Technology*, pp. 77-82, 2003. 2. Scharstein D. and Szeliski R. High-Accuracy Stereo Depth Maps Using Structured Light, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp.195-202, 2003. 3. Sansoni G., Carocci M. and Rodella R. Calibration and Performance Evaluation of a 3-D Imaging Sensor Based on the Projection of Structured Light, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 49, No. 3. – P. 628–636, 2000. 4. Li Y.F. and Chen S.Y. Automatic Recalibration of an Active Structured Light Vision System, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 2. –P. 259–268, 2003. 5. Tsai

M.J., Hung C.C., Kuo S.K. and Lin C.C. Development of A Precision Surface Metrology System, Processing of The 21st National Conference on Mechanical Engineering, pp. 6505–6511, 2004. 6. Kamgar-Parsi B. and Kamgar-Parsi B. Evaluation of Quantization Error in Computer Vision, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 9. – P. 929–940, 1989. 7. Yang C.C. and Ciarallo F.W. Optimized Sensor Placement for Active Visual Inspection, Journal of Robotic Systems, vol.18, no.1. – P.1–15, 2001. 8. Che C. and Ni J. A Generic Coordinate Transformation uncertainty assessment Approach and its Application in Machine Vision Metrology, Int. J. of Machine Tool & Manufacture, Vol. 38. – P. 1241–1256, 1998. 9. Lazzari A. and Iuculano G. Evaluation of the uncertainty of an optical machine with a vision system for contact-less three-dimensional measurement, Measurement, Vol.36. – P.215-231, 2004.

УДК 621.314

В. В. Самотий, У. Ю. Дзелендзяк, В. І. Гудим
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматики і телемеханіки,

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ТА УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДВОПІВПЕРІОДНОГО ВИПРЯМЛЯЧА З СЕРЕДНЬОЮ ТОЧКОЮ ЗА НЕЯВНОЮ СХЕМОЮ

© Самотий В.В., Дзелендзяк У.Ю., Гудим В.І., 2005

Наведено математичну модель однофазного двопівперіодного випрямляча з середньою точкою, орієнтовану на неявні методи числового інтегрування, а також запропоновано методику аналізу перехідних і усталених режимів його роботи.

The mathematical model of single-phase bisemiperiodic rectifier with middle point, directed to implicit methods of numerical integration has been given as well as methods of analysis of transient and steady-state operation modes have been suggested.

Вступ

Оснoву більшoсті математичних моделей складають рівняння динаміки досліджуваного пристрою. Залежно від того, наскільки ці рівняння відповідають фізиці процесів, що відбуваються в пристрої, буде визначатися ідентичність їх розв’язання реальним експериментальним даним. У цій роботі досліджують електромагнетні процеси двопівперіодного випрямляча з середньою точкою у вихідній обвитці трансформатора. Складність аналізу таких задач пов’язана з двома типами нелінійностей, що тут спостерігаються. Перший тип зумовлений наявністю трансформатора, в якому характеристика осердя є нелінійною і має гістерезисний характер. Другий тип нелінійності викликаний напівпровідниковими вентилями.

Математичне моделювання дає змогу розв’язати дві основні задачі динаміки – це розрахунок перехідних та усталених режимів. Перша задача зводиться до задачі Коші – числового інтегрування рівнянь динаміки від заданих початкових умов на певному часовому проміжку. Якщо інтегрування виконувати на достатньо значному проміжку часу, то можна отримати усталений режим. Аналіз усталених режимів нелінійних пристроїв є складнішою задачею, яка зводиться до обчислення початкових умов, що задовольняють умову періодичності.

Методи аналізу режимів роботи пристроїв з вентилями умовно можна поділити на дві великі групи, залежно від прийнятої моделі роботи напівпровідникового вентиля. Перша група моделює роботу вентиля електричною ланкою зі змінними параметрами: у відкритому стані опір вентиля приймають достатньо малим, а в закритому – достатньо великим [1].