

УДК 004.021;004.932;621.391+519.673

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ ОКОНТУРИВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, АППРОКСИМИРОВАННЫХ ОДНОРОДНЫМИ МАРКОВСКИМИ ПОЛЯМИ

Д.В. Дубинин, В.Е. Лаевский*, А.И. Кочегуров**

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: dima@info.tusur.ru

*Rausch GmbH & Co. Electronic-Maschinenbau, г. Friedrichshafen, Германия

E-mail: viktor.e.laevski@gmx.de

**Томский политехнический университет

E-mail: kai@cc.tpu.edu.ru

Предложен обобщенный критерий для оценки качества контурных рисунков объектов на изображениях. Эффективность критерия показана на примере сравнения трёх алгоритмов («Canny», «Marr» и «Serr») оконтуривания. При этом тестируемые изображения являлись смесью двумерного одноуровневого марковского поля и аддитивного шума с нормальным законом распределения.

Ключевые слова:

Граница, контурный рисунок изображения, контурный препарат, оконтуривание, критерий качества, субоптимальные оценки качества оконтуривания, марковское поле, стохастическое моделирование.

Key words:

Edge, gradient maps, edge image, edge detection, quality metrics, appraisal of quality, comparison of algorithms, homogeneous Markov random fields, stochastic fields, stochastic modelling.

Введение

В большинстве работ, связанных с описанием контурных детекторов или качеством их работы, имеет место ряд субъективных факторов. Так, в качестве эталонных изображений, которые применяются для исследования работы контурных детекторов, используют обычно снимки девушки, танка, самолёта, машины, натюрморга, шахматной доски, простейших геометрических фигур (квадрата, треугольника, параллелограмма) [1, 2]. Субъективный выбор исходных тестовых изображений влияет на результаты исследования. При этом качество оценки зависит от выбора того или иного изображения, которое связано с определенной предметной областью.

Одним из возможных подходов к получению тестовых изображений является использование алгоритмов, основанных на построении управляемого однородного марковского поля. Такой подход позволяет управлять вероятностными и спектральными свойствами генерируемого поля, его морфологией [3, 4], получать векторное описание контурного рисунка, лежащего в его основе. Один из алгоритмов построения однородного марковского поля с различными типами морфологии был детально описан в работе [5], а методика проведения тестирования алгоритмов оконтуривания обсуждалась в работе [6].

Показатели качества выделения контурного рисунка изображения

Известно, что реальным оптическим изображениям соответствуют поля яркости, близкие к кусочно-постоянным функциям двух переменных, т. е. поля, состоящие из областей, внутри которых яркость почти не меняется и которые отделены друг от друга резкими границами – контурами. За-

дачей контурного детектора является выделение контурного рисунка из исходного двумерного изображения. К основным типам ошибок (рис. 1), вносимых детекторами контуров в искомый контурный препарат, можно отнести: смазывание контура, локальные и глобальные смещения, разрывы контурного рисунка.

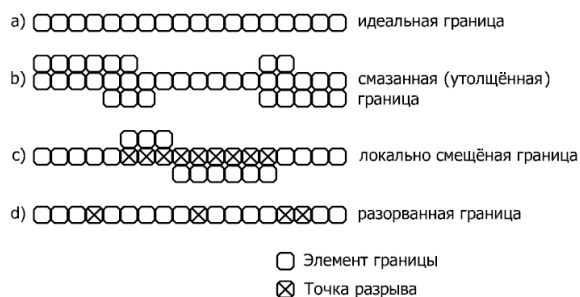


Рис. 1. Основные типы ошибок, вносимых операторами оконтуривания

Эффективность алгоритмов поиска и локализации границ на практике можно оценить исходя из следующих результатов обработки:

- точность определения точек контурного рисунка;
- однозначность каждой границы (для каждой границы объекта должна существовать только одна выделенная граница контурного рисунка);
- устойчивость детектора к воздействию шума;
- скорость нахождения контурного рисунка;
- необходимая память для проведения обработки;
- толщина выделяемой границы (должна стремиться к одной точке);
- отсутствие смещения контурного рисунка.

Поэтому в данной работе для оценки качества выделения контурного рисунка были выбраны пять показателей:

1. Схожесть $F|_{\vec{P}^0}$ получаемого контурного рисунка с априорно известным, основополагающим описанием марковского поля.
2. Оценка толщины контурных линий $R_d|_{\vec{P}^0}$, полученной в процессе выделения контурного рисунка изображения.
3. Оценка средней длины разрывов $L|_{\vec{P}^0}$ контурного рисунка.
4. Оценка полной арифметической сложности алгоритма $K_{пл}|_{\vec{P}^0}$.
5. Оценка смещения контурного рисунка $R_{ск}|_{\vec{P}^0}$ относительно его истинного положения.

Необходимые пояснения

Введём ряд пояснений, необходимых для более детального описания совокупности показателей качества контурного рисунка. Примем, что результат пороговой обработки градиентного изображения имеет следующий вид:

$$SV(x, y) = \begin{cases} 1, & g(x, y) \geq T \\ 0, & g(x, y) < T \end{cases}$$

где $g(x, y)$ – градиентное изображение; $T = \bar{f}(x, y)$ – адаптивная величина порогового значения; $SV(x, y)$ – растровое бинарное изображение контурного рисунка.

Двумерный массив значений $SV(x, y)$ зависит от ряда входных параметров и от адаптивного порога $T = \bar{f}(x, y)$. В дальнейшем выражение $SV(x, y)$ будем представлять в виде $SV(x, y, \vec{P}^0)$ и понимать под этим трёхмерный массив. Изменение значений по \vec{P}^0 позволяет производить адресацию значений бинарного изображения $SV(x, y)$, исходя из совокупности исходных параметров $\vec{P}^0 = (G^0, \alpha, \dots, \gamma)$ оператора оконтуривания. Также в дальнейшем изложении при вычислении оценок схожести, двумерный массив значений $v(j, i)$ будет заменён одномерным динамическим массивом размерностью M (количество контурных векторов), элементами которого являются связанные списки значений структуры G^0 (описание координат отдельно взятой точки контурного вектора и ряд других параметров). Каждый список имеет различную длину N_j и включает в себя описание последовательности точек отдельно взятого j -го контурного вектора.

Оценка схожести контурного вектора с растровым изображением

Проводя сопоставление описания границ, получаемого в процессе выделения контурного ри-

сунка $SV(x, y, \vec{P}^0)$ с априорно известным, основополагающим описанием марковского поля, величину схожести границ можно определить из соотношения:

$$F|_{\vec{P}^0} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{\sum_{i=1}^{N_j} SV(v(j, i).X, v(j, i).Y, \vec{P}^0)}{N_j},$$

где $v(j, i)$ – структура данных, содержащая исходную совокупность контурных векторов; j – индекс контурного вектора совокупности; i – индекс точки в j -м контурном векторе; N_j – длина j -го контурного вектора; M – количество контурных векторов; $v(j, i).X$ – значения координат по оси x отдельно взятой i -й точки в j -м контурном векторе; $v(j, i).Y$ – значения координат по оси y отдельно взятой i -й точки в j -м контурном векторе; $\vec{P}^0 = (G^0, \alpha, \dots, \gamma)$ – совокупность параметров оператора оконтуривания.

Оценка толщины контура

Величина, характеризующая толщину выделенной контурной линии, вычисляется по формуле:

$$R_{АкФ}(KK, LL)|_{\vec{P}^0} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{\sum_{i=1}^{N_j} SV \left(\begin{matrix} v(j, i).X + LL \cdot \Delta x, v(j, i).Y + \\ + KK \cdot \Delta y, \vec{P}^0 \end{matrix} \right)}{N_j},$$

где $R_{АкФ}$ – значения автокорреляционной функции при фиксированном значении \vec{P}^0 ; Δx и Δy – шаг сдвига, LL и KK – величина сдвига.

На основе $R_{АкФ}(KK, LL)|_{\vec{P}^0}$ вычисляются значения корреляционных функций в горизонтальном, вертикальном и диагональных направлениях (рис. 2).

После усреднения автокорреляционной функции получаем значения сдвига на одну, две, три точки при определённом отношении сигнала к шуму.

$$R_{\Sigma}(n)|_{\vec{P}^0} = \frac{R_d(0, n, \vec{P}^0) + R_d(n, n, \vec{P}^0) + R_d(n, 0, \vec{P}^0)}{3},$$

$n \in \mathbb{N}, n = 1, 2, \dots, J,$

где J – максимальное значение сдвига.

Полученные кривые являются убывающими функциями положительного аргумента. При достижении корреляционной функцией определённого значения (рис. 3), формируется оценка толщины контурной линии. За величину значения n

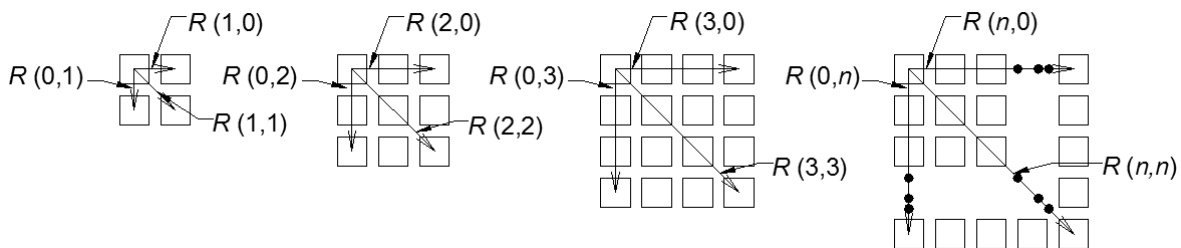


Рис. 2. Процесс вычисления корреляционной функции

берётся наибольшее целое, при котором выполняется условие $(R_z(n)|_{\bar{P}^0} - 0,65) > 0$. Опорное значение $R_{0l|\bar{P}^0}$ показателя качества «толщины контура» контурных рисунков изображений находится по формуле: $R_{0l|\bar{P}^0} = B/2$, где B – значение величины окна расчёта корреляционной функции в горизонтальном или вертикальном направлениях.

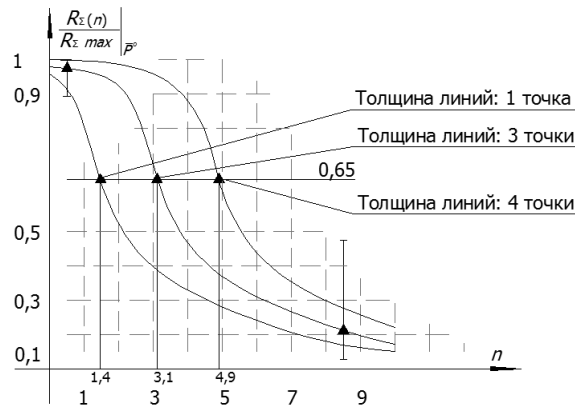


Рис. 3. Определение толщины контурной линии

При этом количественную оценку показателя качества «толщины контура» можно вычислить по следующей формуле: $R_{dl|\bar{P}^0} = n/R_{0l|\bar{P}^0}$, где n – оценка толщины контура; $R_{0l|\bar{P}^0}$ – опорное значение показателя качества; $R_{dl|\bar{P}^0}$ – оценка толщины контура при фиксированном значении исследуемого оператора оконтуривания.

Оценка средней длины разрывов контурного рисунка

Немаловажным параметром является средняя длина разрыва контурного рисунка $L|\bar{P}^0$, за счёт воздействия шумовой составляющей. Под воздействием шума происходит разрушение контурного рисунка (рис. 4), а в некоторых случаях появляются ложные (рис. 1) границы. В связи с этим, для оценки непрерывности контурного рисунка используется выражение:

$$L|\bar{P}^0 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{N_j - \sum_{i=1}^{N_j} SV(v(j,i).X, v(j,i).Y, \bar{P}^0)}{K_j},$$

где K_j – количество секторов в j -м векторе; N_j – длина j -го контурного вектора.

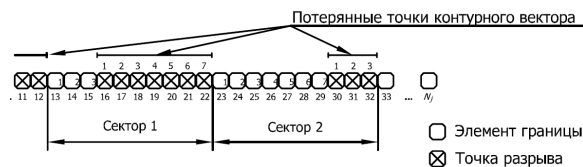


Рис. 4. Последовательность точек в j -м контурном векторе

Оценка сложности алгоритмов получения контурного рисунка

Выделение контурного рисунка должно происходить за приемлемое время. Для этого нужно оце-

нить вычислительную сложность алгоритма детектирования. В данной работе оценка полной вычислительной сложности рассматриваемого алгоритма $K_{ПАС}|\bar{P}^0$ находится путем весового суммирования вычислительной сложности отдельных математических операций, которые необходимы для определения границы, в соответствии с формулой:

$$K_{ПАС}|\bar{P}^0 = a_1 N_{[+]}(\bar{P}^0) + a_2 N_{[-]}(\bar{P}^0) + a_3 N_{[*]}(\bar{P}^0) + a_4 N_{[|]}(\bar{P}^0) + a_5 N_{[\sqrt{\cdot}]}(\bar{P}^0) + a_6 N_{[ATAN]}(\bar{P}^0) + a_7 N_{[MOD]}(\bar{P}^0),$$

где $a_1 - a_7$ – весовые коэффициенты, характеризующие сложность выполнения математической операции; $N_{[+]}(\bar{P}^0)$, $N_{[-]}(\bar{P}^0)$, $N_{[*]}(\bar{P}^0)$, $N_{[|]}(\bar{P}^0)$, $N_{[\sqrt{\cdot}]}(\bar{P}^0)$, $N_{[ATAN]}(\bar{P}^0)$, $N_{[MOD]}(\bar{P}^0)$ – количество операций сложения, вычитания, умножения, деления, вычисления квадратного корня, арктангенса, остатка целочисленного деления соответственно.

С помощью моделирования на ПЭВМ оценена вычислительная сложность данных математических операций. За единицу была выбрана сложность операции сложения. Результаты моделирования приведены в таблице.

Таблица. Рассчитанные оценки вычислительной сложности операций

Операция	Сложение	Вычитание	Умножение	Деление	Извлечение квадратного корня	Вычисление арктангенса	Вычисление остатка целочисленного деления
Весовой коэф. a_i	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Значение	1	1	4,19	4,50	12,85	12,84	9,30

Расчёт полной вычислительной сложности алгоритмов производился при фиксированном значении параметров оператора оконтуривания P^0 по следующей формуле:

$$K_{ПАС_i}|\bar{P}^0 = \frac{K_{ПАС_i}|\bar{P}^0}{\max[K_{ПАС_1}|\bar{P}^0, K_{ПАС_2}|\bar{P}^0, \dots, K_{ПАС_U}|\bar{P}^0]},$$

где i – номер тестируемого алгоритма; U – количество исследуемых алгоритмов; $K_{ПАС_i}|\bar{P}^0$ – полная арифметическая сложность отдельно взятого алгоритма.

Оценка смещения контурного рисунка

В некоторых случаях воздействие шума может приводить к вертикальному или горизонтальному смещению контурного рисунка. В связи с этим, был введен показатель качества оконтуривания, позволяющий оценить такой сдвиг. Оценка смещения находится на основе расчета автокорреляционной функции $SV(x_{j1}, y_{j1})|\bar{P}^0$ по следующей формуле:

$$R_{Offset}(KK, LL)|_{\bar{p}^0} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{\sum_{i=1}^{N_j} SV \left(v(j,i) \cdot X + LL \cdot \Delta x, v(j,i) \cdot Y + KK \cdot \Delta y, \bar{P}^0 \right)}{N_j} \rightarrow MAX_{KK, LL}$$

Опорное значение $R_{Offset 0}|_{\bar{p}^0}$ показателя качества «сдвига контура» определяется по формуле: $R_{Offset 0}|_{\bar{p}^0} = \sqrt{B^2 + H^2}$, где B – значение величины окна расчёта корреляционной функции в горизонтальном направлении, H – значение величины окна расчёта корреляционной функции в вертикальном направлении. В общем случае B равно H . Тогда оценку сдвига контурного рисунка можно вычислить по формуле:

$$R_{CK}|_{\bar{p}^0} = \frac{\sqrt{KK^2 + LL^2}}{R_{Offset 0}|_{\bar{p}^0}},$$

где LL и KK – сдвиг по горизонтали и вертикали соответственно.

$R_{CK}|_{\bar{p}^0}$ – является возрастающей функцией. Поэтому, чем меньше значение смещения контурного рисунка от его истинного значения, тем более качественно работает алгоритм оконтуривания.

Обобщенный критерий оценки качества оконтуривания

Для сравнения разных алгоритмов выделения контурного рисунка необходимо свести совокупность отдельных показателей качества к обобщенному или результирующему показателю. Существуют

различные методы такого сведения [7]. В данной работе используется метод весового суммирования.

Учитывая, что меньшее значение показателя качества соответствует лучшей системе [7], описанные выше характеристики детектирования были использованы для нахождения совокупности показателей качества:

$$K_1|_{\bar{p}^0} = 1 - F|_{\bar{p}^0}, \quad K_2|_{\bar{p}^0} = R_d|_{\bar{p}^0}, \quad K_3|_{\bar{p}^0} = L|_{\bar{p}^0},$$

$$K_4|_{\bar{p}^0} = K_{ПАС}|_{\bar{p}^0}, \quad K_5|_{\bar{p}^0} = R_{CK}|_{\bar{p}^0}.$$

Используя функцию весового суммирования, определим обобщенный показатель качества нахождения контурного рисунка:

$$K_{общ.кр. качества} = \lambda_1 K_1' + \lambda_2 K_2' + \lambda_3 K_3' + \lambda_4 K_4' + \lambda_5 K_5',$$

где $K_i' = K_i / K_{i0}$ – i -й показатель качества системы; K_{i0} – опорное значение i -го показателя качества; λ_i – весовые коэффициенты, сумма которых равны единице.

Выбор значений весовых коэффициентов производится с учётом предметной области использования алгоритмов, применяемого аппаратного и программного обеспечения, а также конкретных условий реализации. В данной работе использовались значения λ_i :

$$\{\lambda_1 = 0,4; \lambda_2 = 0,05; \lambda_3 = 0,4; \lambda_4 = 0,1; \lambda_5 = 0,05\}.$$

Результаты компьютерного моделирования

Описанная выше методика была апробирована с помощью компьютерного моделирования. Сравнительный анализ проводился для трех алгоритмов «Canny», «Marr^a» и «Shen^a». В качестве исходных

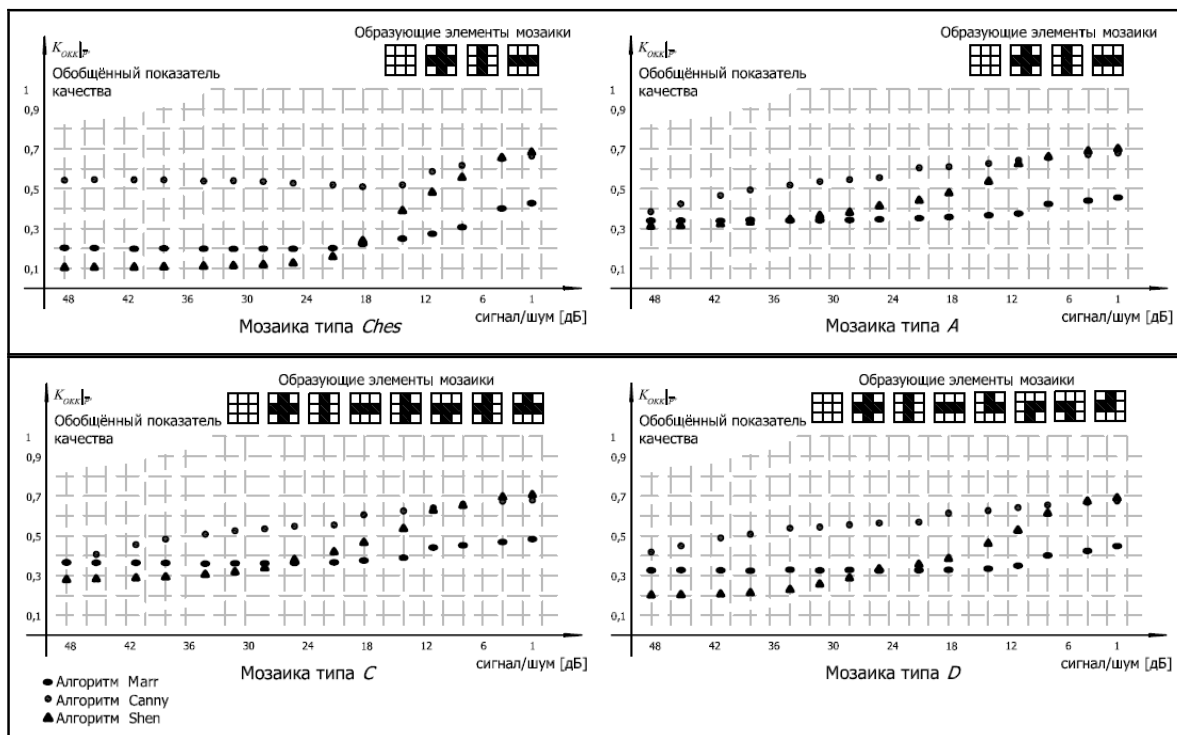


Рис. 5. Зависимость $K_{общ}|_{\bar{p}^0}$ от отношения сигнал/шум

данных использовались растровые изображения шахматной доски (типа «Ches») и мозаики, полученные при генерации одноуровневого марковского поля с морфологиями «А», «С» и «D». Оценивались значения обобщенного показателя качества при различных отношениях сигнал/шум. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

Из рисунка видно, что обобщенный критерий оценки качества алгоритмов оконтуривания изображений, позволяет получить количественные значения качества оконтуривания изображений в зависимости от типа мозаик и соотношения сигнал/шум.

Заключение

Предлагаемый в работе обобщенный критерий оценки контурных рисунков, позволяет получать объективную оценку качества работы алгоритмов оконтуривания и производить их количественное сравнение. Обобщенный количественный критерий объединяет пять основных показателей качества детектирования, каждый из которых имеет свой весовой коэффициент. Представленный механизм оценки дает возможность выявить тенденции поведения алгоритмов оконтуривания, а также дать ряд рекомендаций по их использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jähne B. Digitale Bildverarbeitung. – Berlin: Heidelberg, Springer-Verlag, 2010. – 650 S. ISBN 978–3–642–04951–4.
2. Liedtke C.-E., Ender M. Wissensbasierte Bildverarbeitung. – Berlin: Springer-Verlag, 1989. – 224 S. ISBN 3–540–50641–1.
3. Буймов А.Г. К статистике пальмовских полей // Автметрия. – 1981. – № 6. – С. 13–18.
4. Буймов А.Г., Ильин С.П., Мозаичное изображение с управляемой корреляцией // Автметрия. – 1987. – № 5. – С. 30–35.
5. Лаевский В.Е. Алгоритм построения одноуровневых марковских полей // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 8. – С. 32–36.
6. Лаевский В.Е. Методика субоптимальной оценки работы алгоритмов получения контурного рисунка изображений // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. – С. 126–131.
7. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. – М.: Советское радио, 1975. – 224 с.

Поступила 08.10.2010 г.

УДК 681.3

АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

И.В. Цапко, С.Г. Цапко

Томский политехнический университет
E-mail: irina@aics.ru

Предложены методы обработки изображений, полученных методом трехмерного сканирования. Подробно рассмотрен алгоритм совмещения отдельных сканируемых поверхностей изделия. Разработана методика формирования модели изделия в формате стереолитографии на основе первичной информации трехмерного сканера и математических методов обработки трехмерной графики. Приведены результаты апробации алгоритма построения сканирования, использующего z-буфер применительно к задачам очистки сканированного трехмерного изображения.

Ключевые слова:

3D-сканирование, CAD-система, обработка информации, дизайн, прототипирование.

Key words:

3D-scanning, CAD-system, information processing, design, prototyping.

Достижения научно-технического прогресса в области проектирования и изготовления новых изделий позволяют до минимума сократить временные и материальные издержки, необходимые в течение жизненного цикла изделия. При изготовлении нового изделия, как правило, создают его математическую модель в любой САД-среде. Но часто требуется воссоздать уже существующее изделие, сделать его дубликат. Если изделие имеет простую форму, то процесс проектирования занимает немного времени и требует небольших затрат.

Все становится диаметрально противоположным в случае увеличения сложности объекта, для которого требуется создать копию. Тогда создание математической модели в САД-системе становится практически невозможно, либо требует больших временных и материальных ресурсов.

В данном случае для формирования компьютерного представления изделия можно применить технологию трехмерного сканирования. Трехмерное сканирование – это систематический процесс определения координат точек, принадлежащих по-