УДК 004.932

О. Г. Дерев'янченко, д-р техн. наук,
О. Ю. Бабілунга, канд. техн. наук,
А. С. Яремчук, П. В. Гоцонога

ОЦІНКА СТАНУ РІЖУЧОЇ ЧАСТИНИ ІНСТРУМЕНТУ ЗА 3D МОДЕЛЯМИ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧНОГО ЗОРУ

Анотація. *Розглянуто проблему оцінки стану ріжучого інструменту на основі 3D моделей. Розроблено метод точкового порівняння полігональних 3D моделей об'єктів з перетворенням полігональної моделі інструменту у хмару точок. Проведено комп'ютерний експеримент із застосування розробленого методу в системі оцінки стану ріжучого інструменту. Дані рекомендації по використанню розробленого методу в системах технічного зору.*

Ключові слова*: 3D модель, ріжучий інструмент, оцінка зносу, полігональна модель, хмара точок, багатовидова реконструкція, система технічного зору*

A. G. Derevyanchenko, Sc. D.,
O. Yu. Babilunga, Ph. D.,
A. S. Yaremchuk, P. B. Gotsonoga

TOOL CUTTING PART CONDITION ANALYSIS ON THE 3D-MODELS IN THE MACHINE VISION SYSTEMS

Abstract. *The article exposes the problem of assessment of degree of wear cutting tools based on the 3D models. The method for points comparison polygonal 3D models of objects based on transformation of polygonal model of cutting tool to the cloud of points was developed. Computer experiment on the application of this method in the wear assessment system of the cutting tool was conducted. Recommendations on use of the developed method in machine vision systems were done.*

Keywords: *3D model, cutting tools, wear assessment, polygonal model, cloud of points, multispecies reconstruction, machine vision system*

А. Г. Деревянченко, д-р техн. наук,
О. Ю. Бабилунга, канд. техн. наук,
А. С. Яремчук, П. В. Гоцонога

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА ПО 3D МОДЕЛЯМ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Аннотация*. Рассмотрена проблема оценки состояния режущего инструмента на основе 3D моделей. Разработан метод точечного сравнения полигональных 3D моделей объектов с преобразованием полигональной модели инструмента в облако точек. Проведен компьютерный эксперимент по применению разработанного метода при оценке состояния режущего инструмента. Даны рекомендации по использованию разработанного метода в системах технического зрения.*

Ключевые слова: *3D модель, режущий инструмент, оценка износа, полигональная модель, облако точек, многовидовая реконструкция, система технического зрения*

Вступ. У сучасних інтегрованих виробництвах надійність ріжучого інструменту (РІ) визначає точність, продуктивність і ефективність процесу механічної обробки деталей. Автоматична оцінка стану (зносу) ріжучої частини (РЧ) інструменту особливо важлива при обробці деталей на верстатах з числовим програмним управлінням і гнучких виробничих модулях (ГВМ).

Знос інструменту можна оцінити з використанням непрямих і прямих методів вимірювання. У непрямих методах [1, 2] знос інструменту оцінюється за іншими, порівняно легко вимірними параметрами, які пов'язані із зносом інструменту, наприклад, силі різання, акустичної емісії, вібрації інструменту і т.д.

Прямі методи вимірювання зносу [3, 4], як випливає з їх назви, оцінюють безпосередньо зони зносу на поверхні інструменту оптичними, радіометричними та іншими засобами, застосування яких, вимагає періодичного переривання процесу різання і використання спеціального обладнання. У системах технічного зору в якості такого обладнання виступають джерела світла, фото-камери,

© Бабілунга О.Ю., Дерев'янченко О.Г., Яремчук А.С., Гоцонога П.В., 2014

мікроскопи з високими оптичними властивостями та ін. Дане обладнання входить в структуру сучасних верстатів класу ГВМ і може бути використане в якості необхідного інструментарію при розробці оптичних методів оцінки зносу РІ. Рішення даної задачі вимагає також залучення сучасних інформаційних технологій обробки візуальної інформації, застосування нових підходів до побудови моделі зони зносу і розробці методів оцінки стану ріжучого інструменту.

У роботі розглядається проблема оцінки стану ріжучої частини інструменту по 3D моделям. З точки зору психофізичних властивостей зорового аналізатора людини, аналіз тривимірних даних виглядає більш простим завданням, ніж аналіз зображень, оскільки останній фактично являє собою зворотну задачу: при отриманні двовимірного зображення (фотографії) значна частина інформації про просторову структуру сцени або об'єкта втрачається [5].

Однак на практиці ситуація з тривимірними моделями об'єктів, отриманими в результаті реконструкції, не така оптимістична – часто вони схожі скоріше на карти глибини, ніж на апроксимацію тривимірної форми об'єкта, можуть містити завади або бути розрідженими. Високоякісна модель, що представлена у вигляді хмари точок, в свою чергу, задає положення об'єкта в координатній системі, пов'язаної із землею або навіть в абсолютних координатах. Тому така модель універсальна і ефективна для застосування в системі технічного зору. Розробка методів обробки таких моделей є актуальною.

Метою роботи є розробка методу порівняння форми об'єктів на основі 3D моделей та дослідження його використання при оцінці стану ріжучої частини інструменту.

Постановка задачі дослідження. Аналіз наукових джерел показав, що одним з завдань, яке розглядається при оцінці стану РІ на основі 3D моделей, є завданням визначення параметрів просторового відхилення поточної форми РЧ інструменту від початкової форми. Подібне відхилення може виникнути в процесі експлуатації РІ, наприклад, в результаті зношування інструменту, наявності відколу або наросту на РЧ інструменту [6]. Внаслідок цього формується зона зносу.

Характер зносу ріжучого інструменту, тобто розподіл зносу по робочих поверхнях РІ, залежить від багатьох конкретних умов, в яких проводиться різання. Знос РІ проявляється в появі лунки на передній поверхні, зон зносу на головній і допоміжній задніх поверхнях і в зміщенні вершини РЧ інструменту. Тобто, у більшості випадків практики різання металів, інструмент зношується як по передній, так і по обох задніх поверхнях, що призводить до «об'ємної деформації» різця [6]. При цьому важливою виявляється оцінка форми зони зносу, яка може бути проведена по цифровим зображенням РІ (оцінка площини зносу) із застосуванням контурної сегментації [7], або по тривимірним моделям (оцінка об'єму зносу).

В останньому випадку задача оцінки стану РІ може бути вирішена із застосуванням технології цифрової обробки зображень в 3D просторі [8] в два етапи: тривимірна реконструкція об'єкта (побудова 3D моделі) і оцінка форми об'єкта за отриманими 3D моделями. При цьому, точність оцінки зносу ріжучого інструменту на основі 3D-моделей істотно залежить від точності реконструкції полігональної моделі, побудованої на першому етапі.

Для формування 3D моделі ріжучої частини РІ запропоновано застосувати метод багатовидової тривимірної реконструкції об'єктів, що забезпечує достатню точність реконструкції [9]. Побудова полігональної 3D моделі ріжучої частини РІ і підвищення точності її подання дозволили отримати інформацію про геометрію ріжучої кромки інструменту в тривимірному просторі, що забезпечило необхідні умови для проведення подальших досліджень з оцінки ступеню макро-зносу РЧ інструменту в системах технічного зору.

В даній роботі процес оцінки ступеню зносу ріжучого інструменту за 3D моделями розглянуто на основі порівняння двох полігональних 3D моделей між собою. Моделі, що порівнюються, представляють собою модель поточного стану ріжучого інструменту і модель-еталон з неушкодженою поверхнею.

Розробка методу порівняння 3D моделей. З огляду наукових джерел відомо, що на сьогоднішній день дуже активно розвивається

стохастичний метод оцінки форми тривимірних об'єктів [10]. Алгоритми, що побудовані за даним методом використовуються у випадках, коли об'єкт – представлений у вигляді полігональної моделі, або у вигляді хмари точок, и швидкість оцінки форми об'єкта за 3D моделлю є важливим показником. Однак, попереднє дослідження показало, що функції щільності форми для двох моделей, що побудовані за даним методом виходять дуже подібними, і за ними складно оцінити ступінь зносу ріжучої частини інструменту.

Тому, в даній роботі для порівняння поточної та еталонної 3D моделей РЧ інструменту запропоновано використовувати точкове порівняння моделей з перетворенням полігональної моделі інструменту у хмару точок.

Хмару точок можна представити у вигляді частково неперервної функції форми об'єкта, що залежить від двох змінних: $z = f(x, y)$. Порівняння двох подібних функцій полягає у порівнянні значень двох функцій форми при однакових аргументах. З цього випливає, що функції повинні бути представлені у однаковій сітці, тобто мати однаковий крок дискретизації по координатним осям. Це накладає додаткове обмеження на задачу перетворення полігональної моделі у хмару точок.

Процес перетворення полігональної моделі у хмару точок представляє собою апроксимацію кожного полігону моделі дискретним кінцевим набором точок [5]. Аналогічна задача вирішується для двовимірного простору (наприклад, при відображенні геометричних фігур на екрані монітору). Для цього перевіряються усі точки зображення і визначається: чи належать точки площині, що обмежена полігоном. Для точок, що розташовані дуже близько до границь полігону, знаходиться і вибирається та точка, що лежить найближче до границі полігону, тобто апроксимує площину більш точніше.

У тривимірному просторі задача апроксимації значно ускладнюється, так як полігон може бути орієнтованим будь-яким чином у просторі, необов'язково паралельно одній із координатних площин. Тобто, більшість точок, які знаходяться у середині полігону (що обмежує площину), не будуть лежати цілковито на цій площині, а можуть знаходитись недалеко від неї (аналогічно як точки що дуже близькі до межі полігону у двовимірному просторі).

Тому для апроксимації полігону було використано інший підхід. У першу чергу знаходяться точки, що лежать на площині, якій належить полігон, або лежать дуже близько від неї. На наступному кроці із знайдених точок обираються ті, які потрапляють у площину, що обмежена сторонами полігону.

Відомо [11], що за координатами будь-яких трьох вершин A, B, C можна побудувати в даному координатному просторі загальне рівняння площини та розрахувати відстань від точки з координатами (x_0, y_0, z_0) до визначеної площини за формулою:

$$d = \frac{(Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D)}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \qquad (1)$$

В растровій графіці величина d вимірюється в умовних одиницях відповідно до вибраного кроку дискретизації моделі.

Експериментально підтверджено, що при апроксимації полігону слід обирати множину точок, що відповідає умові:

$$d \le 0{,}5. \qquad (2)$$

На наступному кроці із вибраних точок, що пройшли перевірку за умовою (2) знаходяться ті, що лежать у середині площини, яка обмежена межами полігону. Вибір таких точок базується на принципі рівності площин: якщо фігуру розбити на декілька менших фігур, то сума площ утворених фігур дорівнює площі початкової фігури

$$S = \sum_{i=1}^{n} S_i \,. \qquad (3)$$

Але умова рівності працює лише для двовимірного простору, або коли полігон паралельний одній із координатних площин. Для випадку, коли полігон довільно орієнтований у просторі слід модифікувати вираз (3):

$$\sum_{i=1}^{n} S_i - S <= t, \qquad (4)$$

де t – порогове значення відхилення площі.

У випадку, коли точка D, що перевіряється, не лежить на площині, сума площ трикутників ABD, ACD та BCD дорівнює площі бокової поверхні тетраедру.

Проведено експеримент по визначенню значення параметру ΔS – різниці площі трикутника і суми площ утворених за допомогою точки *D*. Розрахунок було проведено для трикутників різної форми. За результатами експерименту встановлено, що поріг в середньому не перевищує 1 % від площі полігону, тому для перевірки умови (4) будемо використовувати порогове значення $t = 0{,}01 \cdot S$.

Для знаходження та оцінки відмінностей двох 3D моделей необхідно обчислити відстані між двома відповідними точками, що порівнюються. Визначимо точки, які будемо вважати відповідними. Для вирішення цієї задачі, задамо деякий напрямок пошуку. При порівнянні двох моделей, вибирається точка на поверхні моделі, для якої у заданому напрямку шукається точка на іншій моделі. Якщо така точка знайдена, то розраховується відстань між двома точками. Аналогічно робиться для інших точок моделей.

При автоматизованій оцінці зносу ріжучого інструменту, експерт може самостійно задатись напрямком зносу поверхні ріжучого інструменту, спираючись на свої професійні знання та досвід. Якщо напрямок пошуку відповідних точок не відомий, можна по замовченню задатись напрямком, який паралельний вектору нормалі площини, у якій знаходиться точка, або виконувати пошук у декількох напрямках.

В основі алгоритму пошуку двох відповідних точок на моделях в двовимірному просторі лежить алгоритм трасування променів, що в свою чергу заснований на алгоритмі Брезенхема [11]. В роботі запропоновано поширити використання даного алгоритму та адаптувати його для відрізка у тривимірному просторі. Запропоновано застосовувати алгоритм двічі, виконуючи обробку в різних координатних напрямках.

Для простоти викладу припустимо що, $\Delta x > \Delta y > \Delta z$, де $\Delta x = |x_1 - x_0|$, $\Delta y = |y_1 - y_0|$, а $\Delta z = |z_1 - z_0|$. Тоді перший прохід алгоритму в тривимірному просторі виконується в циклі по осі x, обчислюючи прирощення y. У свою чергу, другий прохід алгоритму обчислює прирощення координати z при збільшенні значення координати y, яке обчислено у першому проході алгоритму.

Таким чином, алгоритм пошуку відповідних точок представляє собою проведення прямої із точки на поверхні моделі, у заданому напрямку. При знаходженні кожної точки прямої у просторі робиться перевірка, чи існує точка з цими координатами на іншій моделі? Якщо існує – точку перетину із поверхнею моделі знайдено, якщо ні – продовжуємо пошук. Знайшовши координати точки перетину, розраховуємо відстань між початковою точкою та знайденою точкою.

Розроблений метод точкового порівняння форми об'єктів на основі полігональних 3D моделей представлений наступним алгоритмом.

Крок 1. Пошук коефіцієнтів для рівнянь площин усіх полігонів.

Крок 2. Пошук усіх точок, що задовольняють умові (2) в кожному полігоні.

Крок 3. Пошук серед знайдених точок усіх, які належать площині, що обмежена сторонами полігону – перевірка умови (4).

Крок 4. Пошук для кожної знайденої точки відповідної точки у хмарі точок іншої моделі за допомогою алгоритму трасування променів, та визначення відстані між знайденими точками.

Крок 5. Аналіз величин відстаней між точками на кожному горизонтальному зрізі хмари точок.

Крок 6. Висновок про ступінь відмінності двох моделей на основі величин відстаней між точками.

Результати комп'ютерного моделювання. Даний метод реалізовано в системі технічного зору для оцінки зносу ріжучої частини інструменту. Програмна реалізація системи складається із підсистеми багатовидової реконструкції, підсистеми порівняння полігональних 3D моделей, підсистеми візуалізації результатів роботи та підсистеми графічного інтерфейсу користувача. Програмна реалізація виконана на мові програмування *C++* у середовищі розробки програмних продуктів *Microsoft Visual Studio*. Система створена із використанням відкритих графічних бібліотек *Qt*, *Qwt*, *QwtPlot3D* та *OpenGL*.

Головне вікно системи розподілено на дві вкладки *"Model Viewer"* та *"Model Comparer"*, що призначені відповідно для

перегляду тривимірної моделі (рис. 1) та для порівняння тривимірних моделей між собою.

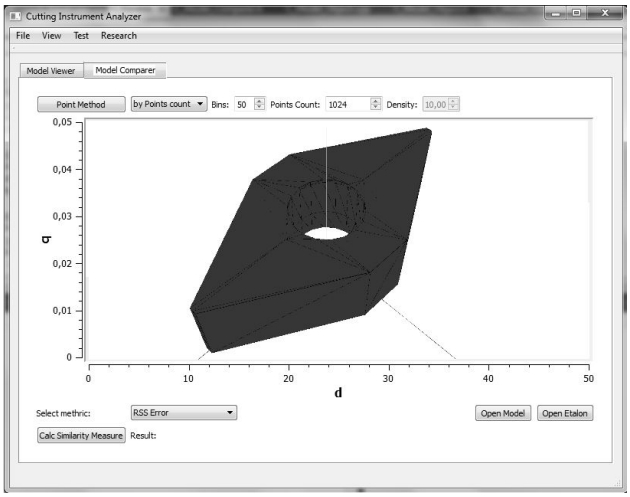

Рис. 1. Інтерфейс підсистеми візуалізації об'єкту

На рисунках 2 і 3 зображені фрагменти еталонної і поточної моделей ріжучого інструменту після перетворення полігональних моделей у хмари точок.

В ході комп'ютерного експерименту по порівнянню даних моделей на усіх зрізах було визначено максимальну і середню відстань між відповідними точками, знайдено місце локалізації зносу, та визначено площу його поверхні.

Максимальна і середня відстані між відповідними точками склала 25 і 14 *одиниць* відповідно. Місце зносу локалізовано у проміжках: *x*: 132 – 176; *y*: 105 – 150; *z*: 110 – 160. Об'єм місця зносу дорівнює $V = 31386\ од^3$. Площа поверхні місця зносу дорівнює $S = 7302\ од^2$.

Як правило, точність оцінки форми об'єктів у першу чергу залежить від точності реконструкції полігональної моделі об'єкта. Але апроксимація полігональної моделі хмарою точок також вносить свою помилку. Помилка вноситься за рахунок округлення дробової частини значення координат, оскільки програмна реалізація використовує лише операції з цілими числами. Тому, для зменшення величини помилки, усі координати вершин полігонів помножаються на масштабний коефіцієнт, що обернено пропорційний кроку дискретизації полігонів моделей.

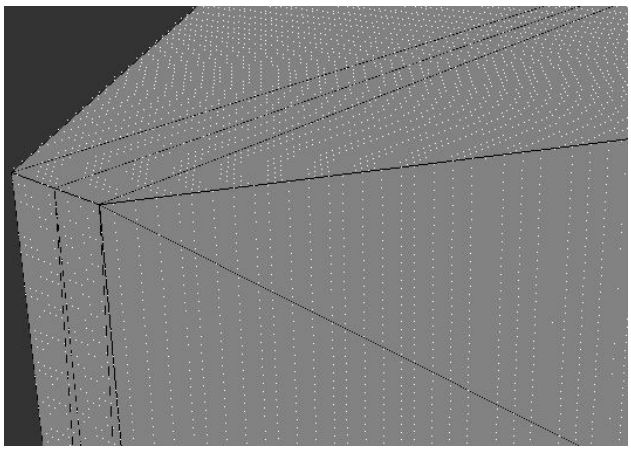

Рис. 2. Зображення еталонної моделі ріжучого інструменту

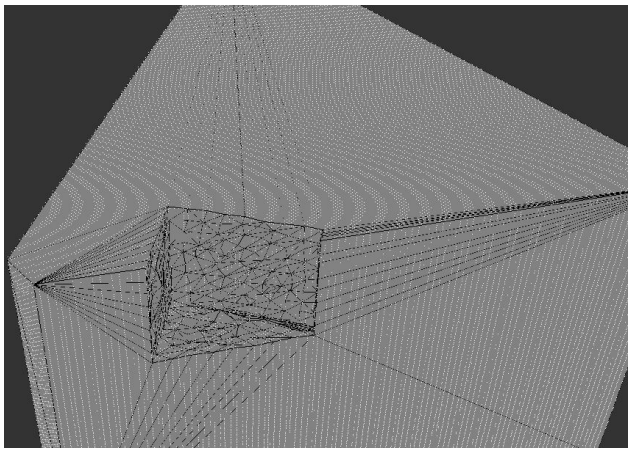

Рис. 3. Зображення моделі ріжучого інструменту зі слідами об'ємного зносу

У таблиці 1 наведено залежність значень різниць об'ємів початкової полігональної моделі та моделі, що апроксимована хмарою точок, від масштабного коефіцієнту.

Різниця об'ємів розраховувалася за формулою:

$$\Delta V = \frac{(V_{base} \cdot scale) - V_{approx}}{(V_{base} \cdot scale)} \cdot 100\,\%, \quad (7)$$

де V_{base} – об'єм початкової полігональної моделі, $scale$ – масштабний коефіцієнт, V_{approx} – об'єм апроксимованої моделі.

У таблиці 2 наведено залежність часу апроксимації полігональної моделі хмарою точок в залежності від масштабного коефіцієнта. Використання масштабного коефіцієнта зі значенням 25 забезпечує достатній рівень точності, в середньому 3,62 %, та час оцінки ступеню зносу РЧ інструменту, в середньому 5625 мс.

1. Залежність відхилення значення об'єму апроксимованої моделі від об'єму початкової моделі

Назва параметру	Значення масштабного коефіцієнта (*scale*)				
	5	10	25	50	100
ΔV, %	10,34	6,21	3,62	2,79	1,98

2. Оцінка часу апроксимації полігональної моделі хмарою точок

Назва параметру	Значення масштабного коефіцієнта *scale*				
	5	10	25	50	100
t, мс	284	814	5625	30709	194446

Висновки. Проаналізовано особливості процесу оцінки стану РЧ інструменту при використанні оптичних методів контролю зони зносу. Показано, що в ряді випадків, є необхідність, оцінювати «об'ємну деформацію» РЧ інструменту на основі порівняння побудованих 3D моделей поточного стану ріжучої частини інструменту і моделі-еталона з неушкодженою поверхнею.

Розроблено метод точкового порівняння форми двох об'єктів за їх 3D моделями, який на відміну від існуючих дозволяє порівнювати об'єкти з незначними відхиленнями форми, що характерно для задачі оцінки стану РЧ інструменту.

В ході комп'ютерного експерименту на тестовій базі моделей РІ встановлено, що застосування даного методу для оцінки стану ріжучої частини інструменту дозволяє локалізувати на моделях місця, що відрізняються від еталонної форми, та розрахувати для них ряд чисельних характеристик: відстані між відповідними точками на моделях, площу поверхні різниці, значення об'ємного зносу.

Показано, що точність оцінки стану РЧ РІ залежить від точності апроксимації полігональної моделі хмарою точок. Досліджено залежність точності та часу оцінки ступеню зносу РЧ інструменту від введеного масштабного коефіцієнта, із ростом якого зростають час апроксимації полігональної моделі хмарою точок та точність оцінки форми 3D моделей. При використанні методу точкового порівняння форми двох об'єктів за їх 3D моделями в системах технічного зору рекомендовано задавати значення масштабного коефіцієнта відповідно з вимогами до реалізації конкретної прикладної задачі.

Список використаної литератури

1. Srinivas J., R. Kotaiah K. Tool wear Monitoring with Indirect Methods, (2005), *Manufacturing Technology Today Publ.*, Vol. 4, pp. 7 – 9.

2. Dimla Sr., D.E., and Lister P.M. On-line Metal Cutting tool Condition Monitoring (I): Force and Vibration Analysis, (2000), *International Journal of Machine Eools and Manufacturing Publ.*, Vol. 40, pp. 739 – 768.

3. Srinivasa P.B., Sarcar M.M. Analysis of Face Milling Operation Using Acoustic Optic Emission and 3D Surface Topography of Machined Surfaces for In-process Tool Condition Monitoring, (2011), *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering Publ*, Vol. 5, Iss. 6, pp. 509 – 519.

4. Jurkovic J.; Korosec M.; Kopac J. New Approach in Tool wears Measuring Technique Using CCD Vision System, (2005), *International Journal of Machine Tools & Manufacture Publ*, Vol. 45, pp. 1023 – 103.

5. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и переработке зрительных образов / Д. Марр. – М. : Радио и связь, 1987. – 400 с.

6. Серебреницкий П. П. Некоторые особенности высокоскоростной механической обработки / П. П. Серебреницкий // Металлообработка. – СПБ-:Питер. – 2007. – № 4. – С. 6 – 15.

7. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. –1072 с.

8. Иванов В. П. Трехмерная компьютерная графика / В. П. Иванов, А. С. Батраков. – М. : Радио и связь, 1995. – 224 с.

9. Бабилунга О. Ю. Формирование 3D-моделей режущей части инструмента в системе технического зрения / О. Ю. Бабилунга, А. Г. Деревянченко, А. С. Яремчук, Д. В. Гончаренко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К. :– 2013. – Вип. 9(85). – С. 163 – 169.

10. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2004. – 928 с.

11. Роджерс Д. Математические основы машинной графики / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М. : Мир, 2001. – 604 с.

Получено 28.02.2014

References

1. Srinivas J., and Rama Kotaiah K. Tool wear Monitoring with Indirect Methods, (2005), *Manufacturing Technology Today Publ.*, Vol. 4, pp. 7 – 9 (In English).

2. Dimla Sr. D.E., and Lister P.M. On-line Metal Cutting tool Condition Monitoring (I): Force and Vibration Analysis, (2000), *International Journal of Machine tools and Manufacturing Publ.*, Vol. 40, pp. 739 – 768 (In English).

3. Srinivasa P.B., and Sarcar M.M. Analysis of Face Milling Operation Using Acoustic Optic Emission and 3D Surface Topography of Machined Surfaces for In-process Tool Condition Monitoring, (2011), *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering Publ.*, Vol. 5, Iss. 6, pp. 509 – 519 (In English).

4. Jurkovic J., Korosec M., and Kopac J. New Approach in Tool wears Measuring Technique Using CCD Vision System, (2005), *International Journal of Machine Tools & Manufacture Publ.*, Vol. 45, pp. 1023 – 103 (In English).

5. Marr D. Zrenie. Informatsionnyiy podhod k izucheniyu predstavleniya i pererabotke zritelnyih obrazov [Vision Information Approach to the Study of Representation and Processing of Visual Images], (1987), Moscow, Russian Federation, *Radio i sviyz Publ.*, 400 p. (In Russian).

6. Serebrenitskiy P.P. Nekotoryie osobennosti vyisokoskorostnoy mehanicheskoy obrabotki [Some High Speed Machining Characteristics], (2007), *Metalloobrabotka Publ.*, St.Peterburg, Russian Federation Iss. 4, pp. 6 – 15 (In Russian).

7. Gonsales R., and Vuds P. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital Image Processing], (2005), Moscow, Russian Federation, *Tehnosfera Publ.*, 1072 p. (In Russian).

8. Ivanov V.P., and Batrakov A.S. Trehmernaya kompyuternaya grafika [Three-dimensional Computer Graphics], (1995), Moscow, Russian Federation, *Radio i sviyz Publ.*, 224 p. (In Russian).

9. Babilunga O. Yu., Derevyanchenko A. G., Yaremchuk A. S., and Goncharenko D. V. Formirovanie 3D modeley rezhuschey chasti instrumenta v sisteme tehnicheskogo zreniya [Forming 3D Models of the Cutting Tools in the Machine Vision System], (2013), Kiev, Ukraine, *Journal Electrotechnic and Computer Systems Publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 9 (85), pp. 163 – 169 (In Russian).

10. Forsayt D., and Pons G. Kompyuternoe zrenie: sovremennyiy podhod [Computer Vision: Modern Approach], (2004), Moscow, Russian Federation, *Mir Publ.*, 928 p. (In Russian).

11. Rodgers D., and Adams Dg. Matematicheskie osnovyi mashinnoy grafiki [Mathematical Foundations of Computer Graphics], (2001), Moscow, Russian Federation, *Mir Publ.*, 604 p. (In Russian).

Бабілунга Оксана Юріївна,
канд. техн. наук, доцент каф. інформаційних систем Одеського нац. політехн. ун-ту,
e-mail: babilunga@mail.ru,
тел. +38048-7058-356

Дерев'янченко Олександр Георгійович,
д-р техн. наук, проф., зав. каф. технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства Одеського нац. політехн. ун-ту,
e-mail: alder50@mail.ru,
тел. +38048-7058-456

Яремчук Андрій Сергійович,
магістр каф. інформаційних системи Одеського нац. політехн. ун-ту,
e-mail: a.s.yaremchuk@gmail.com

Гоцонога Павло Валентинович,
студент, каф. інформаційних систем Одеського нац. політехн. ун-ту,
e-mail: pavel.gotsonoga@gmail.com