

Ю.О. Подчашинський, д.т.н., проф.
О.О. Лугових, ст. викладач
Л.О. Чепюк, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Інформаційно-вимірювальна система для визначення параметрів руху виробничого обладнання з трьома каналами отримання інформації

У статті розроблено структуру інформаційно-вимірювальної системи для визначення параметрів руху виробничого обладнання. Відмінною рисою структурної схеми є використання трьох каналів отримання вимірювальної інформації про параметри руху об'єктів. Для побудови вимірювальних каналів використано сучасні технічні засоби: цифрову стереокамеру та акселерометр. Наявність двох каналів формування цифрових зображень забезпечує визначення параметрів руху в площині зображення та оцінку змін у динаміці відстані до об'єктів вимірювань. За рахунок поєднання елементів штучного інтелекту та формування тривимірної картини цифрова стереокамера локалізує об'єкти в просторі та надає інструменти для створення просторового сприйняття. Забезпечується виявлення просторових об'єктів, відстеження руху об'єктів з просторовим контекстом. Для отримання даних про рух об'єктів використовуються контактні (акселерометр) та безконтактні технології (цифрова стереокамера). Отримано дані про параметри швидкого, повільного та поступального рухів у результаті введення в обчислювальний компонент системи та обробки показів акселерометра, їх об'єднання з даними від цифрової стереокамери. Підвищення точності вимірювання параметрів руху в комп'ютеризованій інформаційно-вимірювальній системі базується на застосуванні програмно-алгоритмічних методів обробки вимірювальних сигналів. При цьому декілька каналів отримання вимірювальної інформації забезпечують інформаційну надлишковість цифрових даних. Це дозволяє підвищити точність підсумкової оцінки параметрів руху за рахунок застосування: процедур виключення результатів з грубими помилками; процедур обробки результатів багатократних вимірювань; об'єднання даних з декількох каналів за методами комплексування.

Ключові слова: машинний зір; зображення; акселерометр; цифрова камера; багатоканальна вимірювальна система.

Актуальність теми. Вимірювання різних механічних величин широко використовуються на підприємствах з видобутку і обробки природного каменю [6]. Такі вимірювання зокрема враховують визначення параметрів руху промислових об'єктів. Результати вимірювань параметрів руху використовуються для управління виробничими процесами та дотримання технологічних норм під час виготовлення виробів із природного каменю, а також для контролю їх якості та підвищення конкурентоспроможності.

Для отримання даних про рух об'єктів можуть використовуватися різноманітні контактні та безконтактні технології й пристрої: акселерометри, гіроскопічні перетворювачі, радіочастотна ідентифікація, системи навігації з пристроями GPS, побудова та обробка часових відеореєстрів.

Розвиток сучасних інформаційно-вимірювальних систем вимагає як удосконалення конструктивних рішень, так і розробки програмно-алгоритмічних методів обробки вимірювальної інформації. Крім того, важливим завданням є розробка безконтактних методів вимірювання, наприклад, на основі відеоінформації про цей об'єкт.

Підвищення точності вимірювання параметрів руху в комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних системах насамперед базується на застосуванні програмно-алгоритмічних методів обробки вимірювальних сигналів. При цьому бажано мати декілька каналів отримання вимірювальної інформації, що забезпечують інформаційну надлишковість цифрових даних. Це дозволяє підвищити точність підсумкової оцінки параметрів руху за рахунок застосування: процедур виключення результатів з грубими помилками; процедур обробки результатів багатократних вимірювань; об'єднання даних з декількох каналів за методами комплексування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Методи та алгоритми обробки зображень розглянуто в роботах Gonzalez and Richard E. Woods [1], Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins [2]. Вимірювання параметрів руху об'єктів на основі комп'ютеризованої обробки відеозображень розглянуто у [3–6]. Принципи комп'ютерного зору розглянуто у [7]. Пристрій для вимірювання параметрів руху об'єктів розглянуто у [8]. Спосіб визначення геометричних параметрів об'єкта вимірювань, що рухається, розглянуто у [9].

Метою статті є розробка інформаційно-вимірювальної системи для визначення параметрів руху виробничого обладнання з трьома каналами отримання інформації на базі цифрової двоканальної стереокамери та акселерометра.

Викладення основного матеріалу. Для контролю за роботою виробничого обладнання необхідно вимірювати параметри руху складових частин цього обладнання. Зокрема:

- поточні координати x та y ;
- швидкість v ;
- прискорення a .

Зазначені параметри визначаються на основі проєкцій тривимірного простору з об'єктами вимірювання в площину зображень. Переміщення об'єкта вимірювання вважається плоскопаралельним рухом у площині зображення. Безпосередньо вимірюються проєкції вектора переміщення на осі координат цифрового зображення з урахуванням прямокутної форми растра цього зображення. За проєкціями вектора переміщення обчислюють модуль і напрямок вектора переміщення, швидкості та прискорення в площині зображення.

Маємо математичну модель складного плоскопаралельного руху з двома компонентами:

- поступальний рух центра мас об'єкта;
- обертання об'єкта навколо центра мас [4, 5].

Схему вимірювання параметрів руху в комп'ютеризованій інформаційно-вимірювальній системі з трьома каналами отримання вимірювальної інформації наведено на рисунку 1.

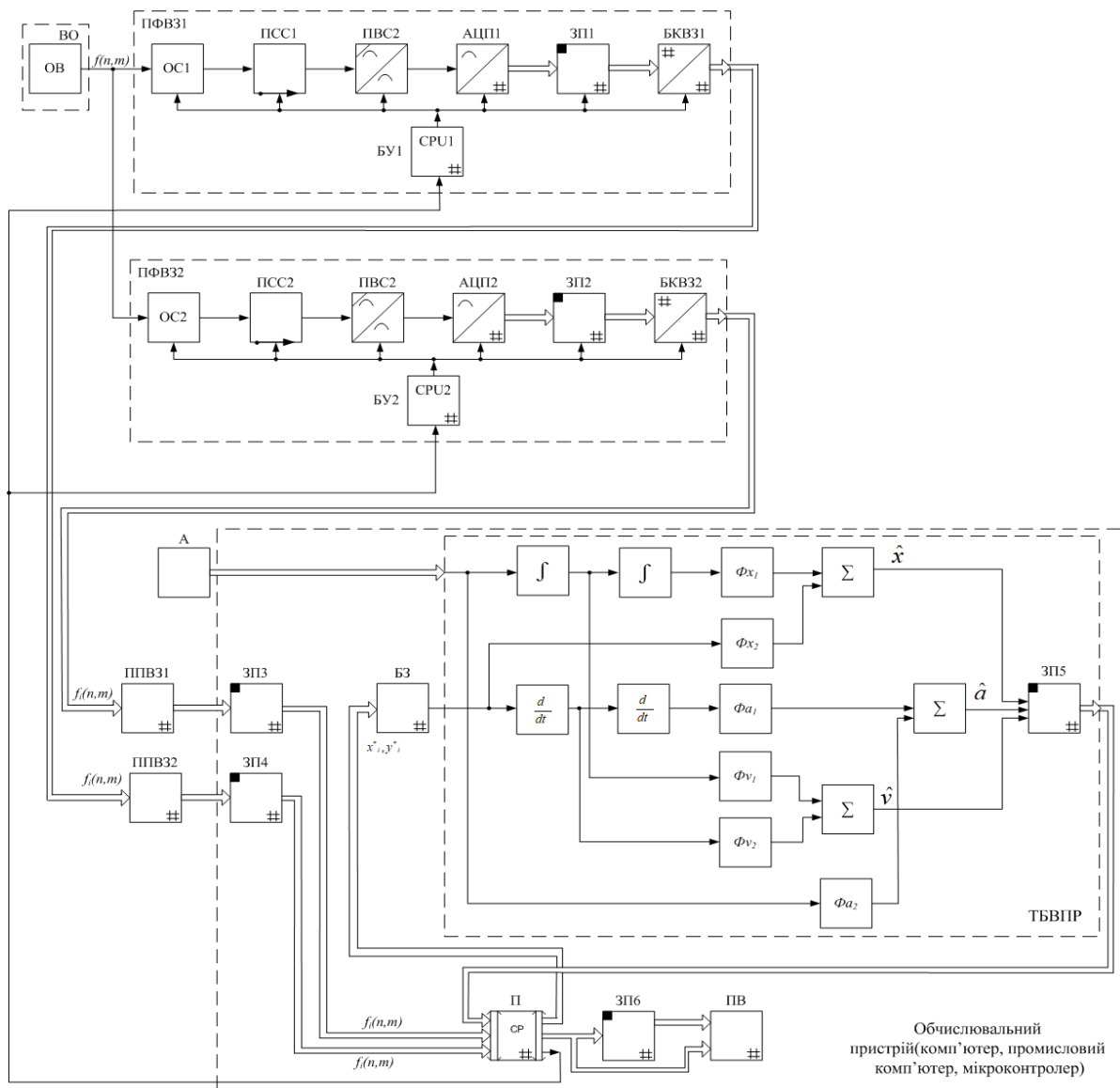


Рис. 1. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система визначення та контролю параметрів руху

На рисунку 1 позначено: ОВ – об’єкт вимірювання; ВО – виробниче обладнання; ПФВЗ1, ПФВЗ2 – пристрій формування відеозображень; ОС1, ОС2 – оптична система ПФВЗ1, ПФВЗ2; ПСС1, ПСС2 – перетворювач світло – сигнал; ПВС1, ПВС2 – підсилювач відеосигналу; АЦП1, АЦП2 – аналого-цифровий перетворювач; ЗП1-ЗП6 – запам’ятовуючі пристрої для відеозображень; БКВЗ1, БКВЗ2 – блок кодування відео зображень; БУ1, БУ2 – блок управління ПФВЗ1, ПФВЗ2; А – акселерометр; ППВЗ1, ППВЗ2 – пристрій передачі відеозображень в обчислювальний пристрій; БЗ – блок згладжування; ТБВІР – триканальний блок визначення параметрів руху у складі обчислювального пристрою; Φ_{x_1} , Φ_{x_2} , Φ_{y_1} , Φ_{y_2} , Φ_{a_1} , Φ_{a_2} – фільтр нижніх частот відповідно координаті, швидкості та прискоренню; Σ – суматор; \int – інтегратор; $\frac{d}{dt}$ – диференціатор; П – процесор обчислювального пристрою; ПВ – пристрій візуалізації відеозображень і результатів вимірювання параметрів руху виробничого обладнання.

Як відеокамеру застосовано цифрову ZED стереокамеру, що забезпечує 2 з 3 каналів отримання вимірювальної інформації (рис. 2). Така нова стереокамера поєднує розширене визначення глибини з штучним інтелектом (ШІ), що дозволяє створювати передові просторові інтелектуальні дані та віртуально відтворювати процеси фізичного світу.



Рис. 2. ZED stereo camera

Відмінні риси ZED stereo camera:

Виявлення просторового об’єкта. Виявлення та відстеження об’єкта з просторовим контекстом. За рахунок поєднання елементів штучного інтелекту та формування тривимірної картини, ZED локалізує об’єкти в просторі та надає інструменти для створення просторового сприйняття.

ZED постачається з міцнішим повністю алюмінієвим корпусом із термоконтролем, який компенсує фокусну відстань і зміщення датчиків руху.

Керування камерою ZED – відеокамера UVC з низькорівневим програмним доступом до пристрою. Він забезпечує контроль над усіма параметрами камери, такими як експозиція, посилення, різкість тощо.

Neural Depth Sensing ZED – перша стереокамера, яка використовує нейронні мережі для відтворення людського зору, виводячи стереозйомку на новий рівень.

Вбудований стек датчиків. Разом із інерційними навігаційними даними ZED також фіксує висоту та магнітне поле у режимі реального часу.

Загальні характеристики [10]:

- вихідна роздільна здатність: 2x (2208x1242) @15fps; 2x (1920x1080) @30fps; 2x (1280x720) @60fps;
- поле огляду максимальне: 110°(висота) x 70°(ширина) x 120°(глибина) 2x (672x376) @100fps;
- діапазон глибин від 0,3 до 20 м;
- інтерфейс USB 3.0/2.0 з вбудованим кабелем довжиною 1,2 м;
- точність визначення глибини розташування об’єктів, похибка відстані: < 1 % до 3 м; < 5 % до 15 м.
- додаткові датчики навігації та просторового положення: гіроскоп, акселерометр, магнітометр;
- датчики параметрів навколишнього середовища: температурний датчик, барометр;
- робоча температура від -10 °C до +45 °C;
- розміри: 175 x 30 x 33 мм;
- вага: 166 г;
- живлення: 380 мА/5 В від USB.

Як акселерометр (третій канал отримання вимірювальної інформації) використано WT61C TTL (рис. 3). Акселерометр WT61C TTL є 6-осьовим високоточним датчиком, містить блок AHRS IMU для

вимірювання кута нахилу за 2 осями, 3-осьовий акселерометр та гіроскоп. Модуль MPU6050 (три осі, вихід з граничною частотою сигналу 100 Гц) містить фільтр Калмана для ПК/Android/Arduino.

Відмінні риси акселерометра WT61C TTL:

- акселерометр WT61C є гарним рішенням для вимірювання кутів, прискорення та кутової швидкості. Він об'єднує 3-осьовий гіроскоп і 3-осьовий акселерометр;
- пристрій поєднує в собі гіроскоп і акселерометр для отримання високоточного вимірювання кута, його можна використовувати як 4-осьовий контроль польоту та самобалансуючий робот, вимірювання кута та глибини тощо;
- пристрій може вимірювати кутове положення в динамічному середовищі. Точність вимірювання положення становить 0,05 градусів, має високу стабільність;
- використовуючи високоточний гіроскопічний акселерометр MPU6050, дані вимірювань зчитуються через послідовний порт. Завдяки передовій технології цифрової фільтрації, зменшується шум вимірювання та підвищується точність вимірювання.



Рис. 3. Акселерометр WT61C TTL

Технічні характеристики акселерометра WT61C TTL [13]:

- напруга живлення: 3,3–5 В;
- струм споживання: типовий 10 мА;
- габаритні розміри: 6 x 51 x 15 мм;
- вимірювання просторового положення та параметрів руху: кут нахилу за 2 осями (крен і тангаж); прискорення за 3 осями; кутова швидкість за 3 осями;
- діапазон вимірювань: прискорення: ± 16 g, кутова швидкість: ± 2000 °/с;
- частота виведення вихідних даних з результатами вимірювань: 100 Гц (швидкість 115200 Бод) / 20 Гц (швидкість 9600 Бод);
- інтерфейс вихідних даних: послідовний (рівень TTL), I2C (безпосередньо підключений до MPU6050);
- швидкість передачі даних 115200 Бод / 9600 Бод.

Для запису об'єктів дослідження було використано програму для запису відео. Один кадр з відеозйомки інформаційно-вимірювальною системою зображено на рисунку 4, де наявний акселерометр, закріплений на об'єкті вимірювань.



Рис. 4. Кадр з відеозйомки інформаційно-вимірювальною системою

Для зняття вимірних даних з акселерометра потрібно завантажити та встановити додаток WitMotion.exe (рис. 5) і драйвер CH340&CP2102 [14].

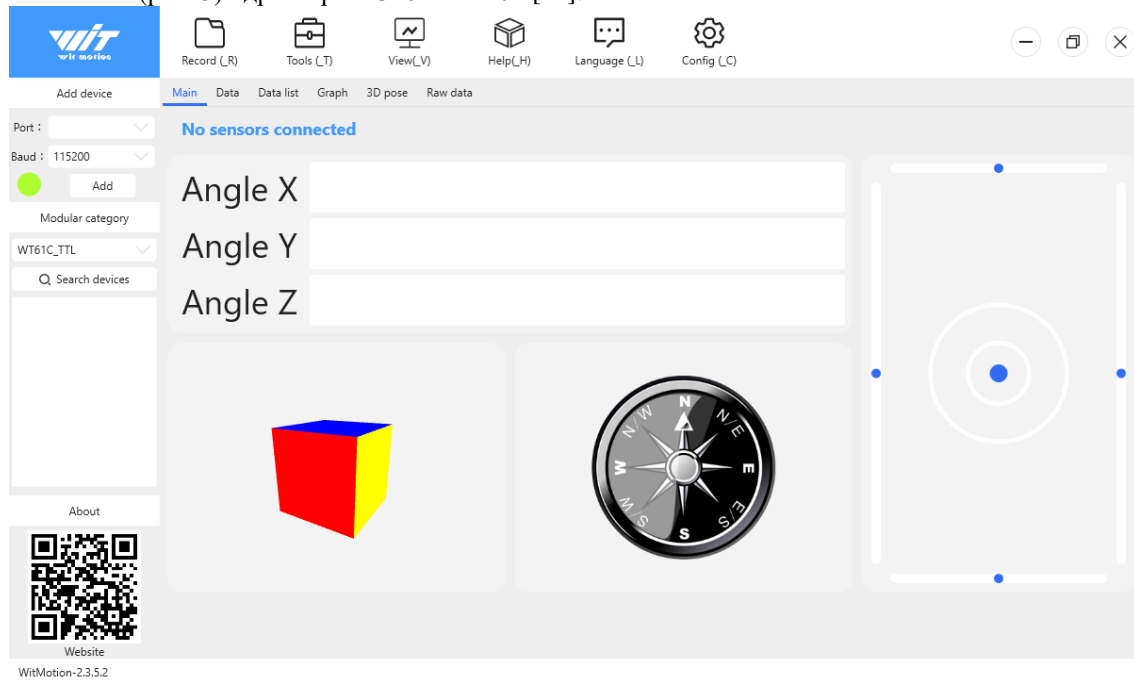


Рис. 5. Робоче вікно додатка WitMotion.exe

Вимірні дані від акселерометра можна отримати в текстовому форматі, в форматі для Excel файлу, в файлі для програми Matlab. Дані вимірювань з виходу акселерометра для відеопотоку з рисунка 4 для різних параметрів руху представлені в таблиці 1. На рисунках 6–8 наведено графіки результатів вимірювання показів акселерометра для швидкого, повільного і поступального рухів відповідно.

Таблиця 1

Дані акселерометра для різних параметрів руху, $Y(g)$ – прискорення, $X(^{\circ}/c)$ – кутова швидкість

Швидкий рух			Повільний рух			Поступовий рух		
Час	Y(g)	X(^{\circ}/c)	Час	Y(g)	X(^{\circ}/c)	Час	Y(g)	X(^{\circ}/c)
11:52:52.251	980	314	11:54:25.832	745	372	11:55:11.506	912	98
11:52:52.251	101	314	11:54:25.832	745	587	11:55:11.506	896	98
11:52:52.261	101	320	11:54:25.848	787	587	11:55:11.521	896	96
11:52:52.276	32	320	11:54:25.864	787	716	11:55:11.537	838	96
11:52:52.291	32	334	11:54:25.864	658	716	11:55:11.537	838	117
11:52:52.291	835	334	11:54:25.880	658	617	11:55:11.553	848	117
11:52:52.306	934	72	11:54:25.896	553	617	11:55:11.553	848	118
11:52:52.322	934	365	11:54:25.896	553	612	11:55:11.569	890	118
11:52:52.322	47	365	11:54:25.911	410	612	11:55:11.584	890	102
11:52:52.338	47	651	11:54:25.927	410	538	11:55:11.584	876	102
11:52:52.338	930	651	11:54:25.927	287	538	11:55:11.599	876	90
11:52:52.354	930	302	11:54:25.942	287	459	11:55:11.615	866	90
11:52:52.369	754	302	11:54:25.942	233	459	11:55:11.791	866	96
11:52:52.369	754	68	11:54:25.958	233	216	11:55:11.791	892	96
11:52:52.385	877	68	11:54:25.972	370	216	11:55:11.791	892	115
11:52:52.401	877	171	11:54:25.972	370	375	11:55:11.791	870	115
11:52:52.401	910	171	11:54:25.988	497	375	11:55:11.791	870	95
11:52:52.416	910	32	11:54:26.003	497	592	11:55:11.791	871	95
11:52:52.431	968	32	11:54:26.003	459	592	11:55:11.791	871	87
11:52:52.431	968	249	11:54:26.019	348	614	11:55:11.792	918	87

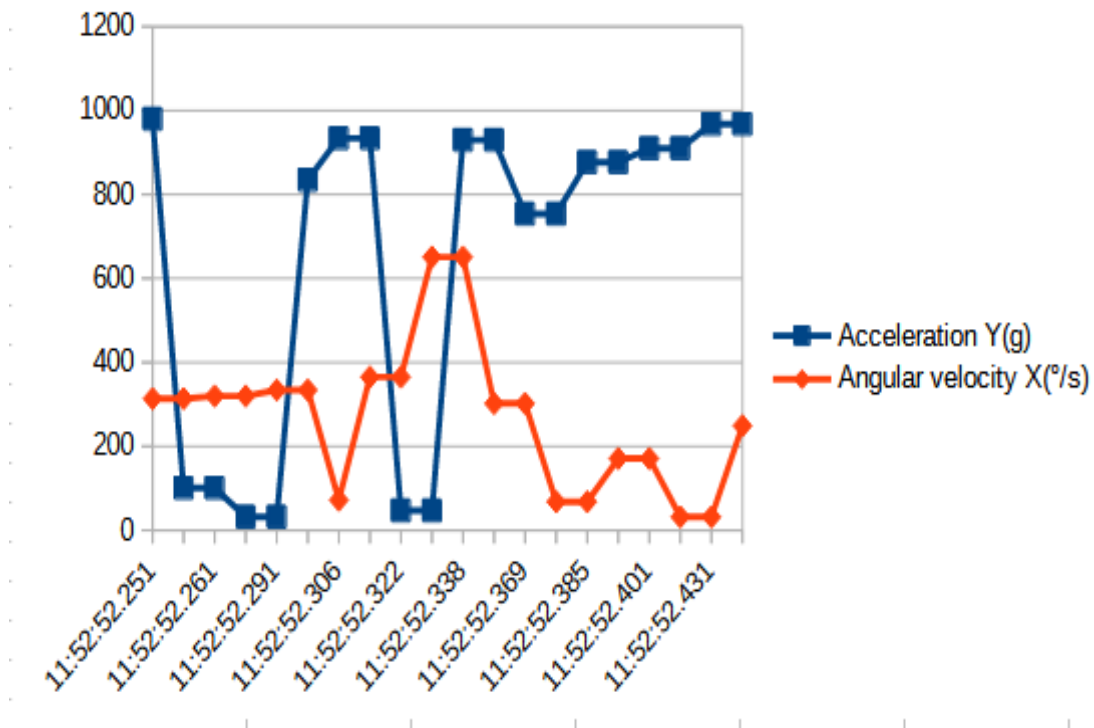


Рис. 6. Результати вимірювання акселерометром параметрів для швидкого руху

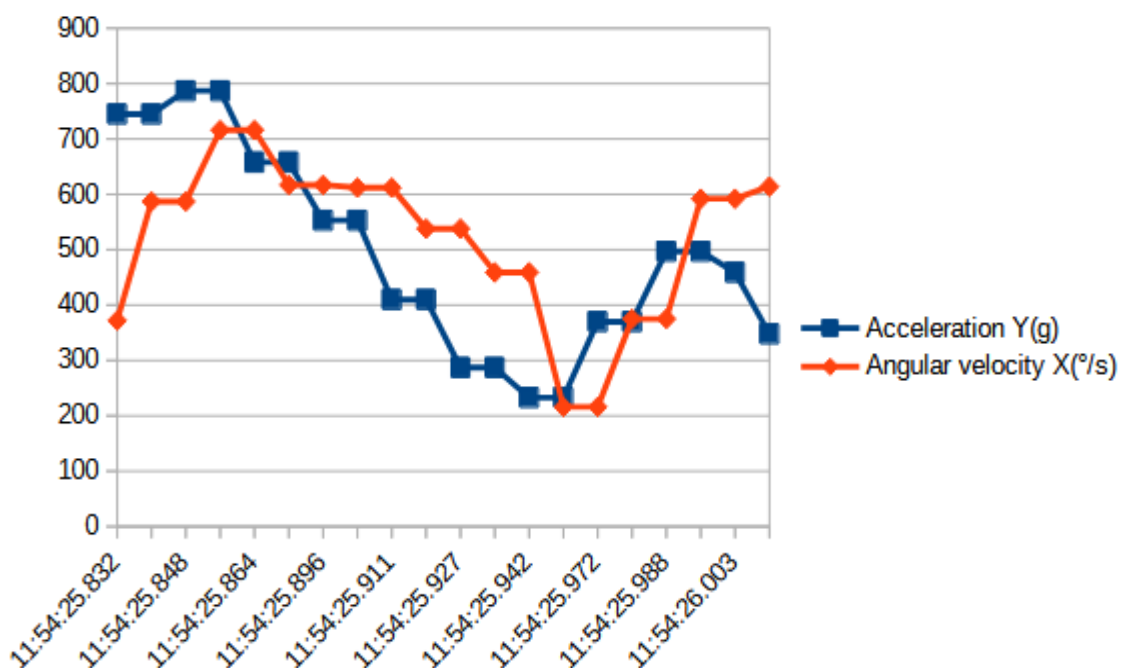


Рис. 7. Результати вимірювання акселерометром параметрів для повільного руху

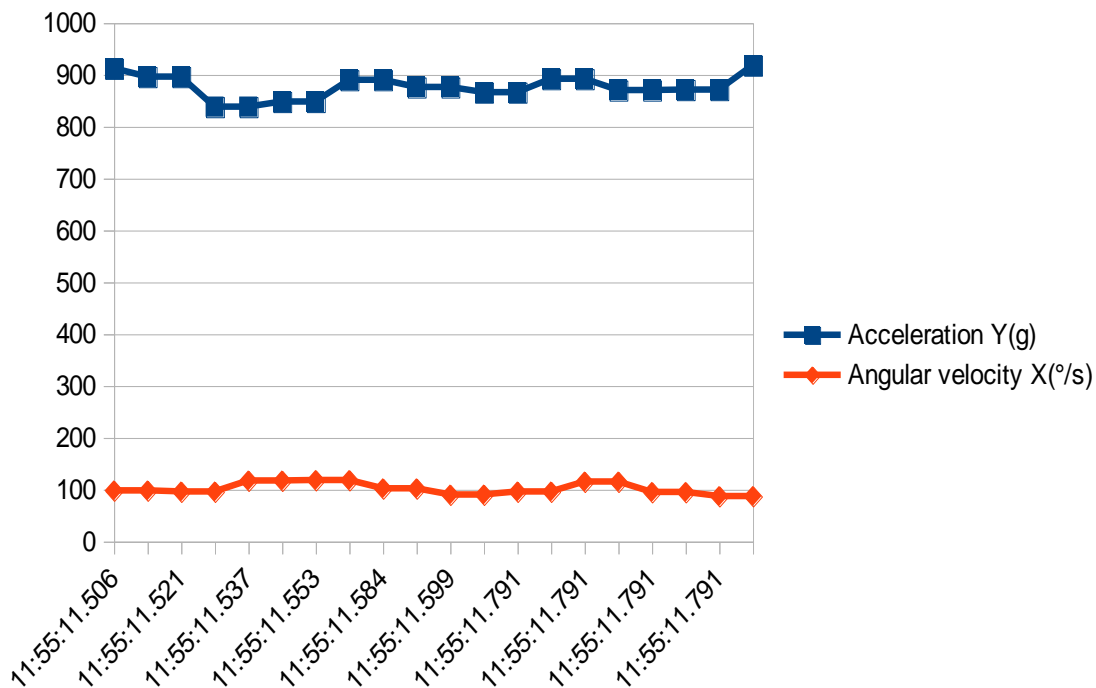


Рис. 8. Результати вимірювання акселерометром параметрів поступального руху

Отриману з виходу стереокамери і акселерометра інформацію можна використовувати для спостереження, контролю та оцінки параметрів руху виробничого обладнання за таким алгоритмом:

1. Вимірюється координата та/або прискорення;
2. Розраховуються інші параметри руху за допомогою чисельних методів інтегрування та/або диференціювання;
3. До результатів вимірювань застосовується один із методів згладжування, що дає можливість зменшити похибки вихідних даних і подальшої трансформованої похибки в наступних розрахунках.

Відмінною рисою запропонованої структурної схеми є використання трьох каналів отримання вимірювальної інформації про параметри руху об'єктів. Для побудови вимірювальних каналів використано сучасні технічні засоби: цифрову стереокамеру та акселерометр. Наявність двох каналів формування цифрових зображень забезпечує визначення параметрів руху в площині зображення та оцінку змін у динаміці відстані до об'єктів вимірювань. За рахунок поєднання елементів штучного інтелекту та формування тривимірної картини, цифрова стереокамера локалізує об'єкти в просторі та надає інструменти для створення просторового сприйняття. Забезпечується виявлення просторових об'єктів, відстеження руху об'єктів з просторовим контекстом. Для отримання даних про рух об'єктів використовуються контактні (акселерометр) та безконтактні технології (цифрова стереокамера). Отримано дані про параметри швидкого, повільного та поступального рухів у результаті введення в обчислювальний компонент системи та обробки показів акселерометра, їх об'єднання з даними від цифрової стереокамери. Підвищення точності вимірювання параметрів руху в комп'ютеризованій інформаційно-вимірювальній системі базується на застосуванні програмно-алгоритмічних методів обробки вимірювальних сигналів. При цьому декілька каналів отримання вимірювальної інформації забезпечують інформаційну надлишковість цифрових даних. Це дозволяє підвищити точність підсумкової оцінки параметрів руху за рахунок застосування: процедур виключення результатів з грубими помилками; процедур обробки результатів багатократних вимірювань; об'єднання даних з декількох каналів за методами комплексування.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Запропоновано схему вимірювання параметрів руху в комп'ютеризованій інформаційно-вимірювальній системі з трьома каналами отримання вимірювальної інформації. Вибрано обладнання для отримання інформації про параметри руху – ZED stereo camera і акселерометр WT61C TTL і наведено їх характеристики. Вибрано програмне забезпечення для зняття вимірюваних даних з акселерометра. Отримано дані від акселерометра для відеопотоку для швидкого, повільного і поступального рухів. Розроблена комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система з трьома каналами отримання вимірювальної інформації може бути застосована для спостереження, контролю та оцінки параметрів руху виробничого обладнання.

References:

1. Gonzalez, Rafael C. & Woods, Richard E (2018), *Digital Image Processing*, 4th edition, Pearson Education Limited, 1022 p.
2. Gonzalez, Rafael C., Woods, Richard E. and Eddins, Steven L. (2020), *Digital Image Processing Using MATLAB*, 3rd edition, Gatesmark Publishing, 1009 p.
3. Podchashynskiy, Yu.O., Luhovykh, O.O. and Shavurskiy, Yu.O. (2018), *Vymiriuvannia parametriv rukhu ob'ektiv na osnovi kompiuteryzovanoi obrobky videozobrazhen*, monohrafiia, ZhDTU, Zhytomyr, 192 p.
4. Korobiichuk, I., Podchashynskiy, Y., Luhovykh, O. et al. (2020), «Theoretical Estimates of the Accuracy of Determination of Geometric Parameters of Objects on Digital Images», *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1140 AISC, pp. 289–299, [Online], available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85082997326&origin=resultslist>
5. Korobiichuk, I., Podchashynskiy, Y., Lugovyh, O. et al. (2017), «Algorithmic compensation of video image dynamic errors with measurement data about geometric and object motion parameters», *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol. 105, pp. 66–71, [Online], available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85017530006&origin=resultslist>
6. Podchashynskiy, Yu.O., Luhovykh, O.O., Tsyporenko, V.V. and Tsyporenko, V.G. (2021), «Devising a method for measuring the motion parameters of industrial equipment in the quarry using adaptive parameters of a video sequence», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 9 (114), pp. 32–46, [Online], available at: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/248624>
7. Forsyth, D.A. and Ponce, J. (2012), *Computer Vision: A Modern Approach*, 2nd edition, Pearson Education Inc, 793 p.
8. Podchashynskiy, Yu.O. & Luhovykh, O.O. (2020), *Patent 140691, Ukraina, MPK (2020.01) G01B 7/00, G01P 3/36 (2006.01) Prystrii dlia vymiriuvannia parametriv rukhu ob'ektiv*, No. u2019 08229, zaivl. 15.07.2019, opubl. 10.03.2020, Biul. No. 5.
9. Podchashynskiy, Yu.O., Shavurskiy, Yu.O. and Luhovykh, O.O. (2019), *Patent 7/04 (2006.01), Ukraina, MPK G01B 7/00, G01B 139726 Sposib vyznachennia heometrychnykh parametriv ob'iektu vymiriuvan, shcho rukhaietsia*, No. u2019 08159, zaivl. 15.07.2019, opubl. 10.01.2020, Biul. No. 1.
10. ZED camera, [Online], available at: <https://www.stereolabs.com>
11. Specification ZED camera, [Online], available at: <https://www.stereolabs.com/docs/video/camera-controls>
12. Accelerometer WT61C TTL, [Online], available at: https://www.amazon.co.uk/Precision-Inclinometer-Accelerometer-Gyroscope-MPU6050/dp/B087WKMB18?ref=ast_sto_dp
13. Software for accelerometer WT61C TTL, [Online], available at: https://drive.google.com/drive/folders/1TLutidDBd_tDg5aTXgjkvz630vt5_8ZZ
14. USER MANUAL WT61C, [Online], available at: <https://m.media-amazon.com/images/I/81ywm8AN09L.pdf>

Подчашинський Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-8344-6061>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання;
- системний аналіз складних технічних систем.

Лугових Оксана Олександрівна – старший викладач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0001-6138-8991>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання;
- системний аналіз складних технічних систем.

Чепюк Ларіна Олексіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-8072-8186>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання;
- системний аналіз складних технічних систем.

Podchashynskiy Yu.O., Luhovykh O.O., Chepiuk L.O.

**Information-measuring system for determining the movement parameters
of production equipment with three channels of information acquisition**

The paper develops the structure of information-measuring system for determining the motion parameters of production equipment. The distinctive feature of the structural scheme is the use of three channels for obtaining measurement information about the parameters of object motion. For construction of measuring channels, the modern technical means are used, i.e. digital stereo camera and accelerometer. Presence of two channels of digital images formation provides determination of motion parameters in the image plane and estimation of changes in the dynamics of distance to the measurement objects. By combining elements of artificial intelligence and three-dimensional picture formation, the digital stereo camera localises objects in space and provides tools for creating spatial perception. Spatial object detection, tracking object motion with spatial context is provided. Contact (accelerometer) and non-contact technologies (digital stereo camera) are used to obtain data on the movement of objects. The data on the parameters of fast, slow and translational motion were obtained as a result of inputting accelerometer readings into the computational component of the system and processing them, combining them with data from a digital stereo camera. Increase of accuracy of measurement of motion parameters in computerised information-measuring system is based on application of software-algorithmic methods of processing of measuring signals. In this case, several channels of measurement data acquisition provide information redundancy of digital data. This allows increasing the accuracy of the final estimation of motion parameters by applying: procedures for excluding results with gross errors; procedures for processing the results of multiple measurements; combining data from several channels according to the methods of complexing.

Keywords: machine vision; image; accelerometer; digital camera; multi-channel measurement system.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2023.