



ЛОКАЛЬНА СИСТЕМА ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА НА ОСНОВІ СТЕРЕОЗОРУ

Кашкар'юв А. О., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

E-mail: anton.kashkarov@tsatu.edu.ua

Анотація – проаналізовано актуальність систем точного землеробства в сучасних умовах сільськогосподарських підприємств України. На підставі аналізу структури землі сільськогосподарських підприємств України акцентована увага на підприємствах площею від 20 до 500 га, які станом на 2017 рік складають 51,7% підприємств, що здійснюють сільськогосподарську діяльність у галузі рослинництва. Ці підприємства вимагають дешевих інженерних рішень, які реалізують елементи точного землеробства. У результаті аналізу ринкових пропозицій систем точного землеробства, прикладів впровадження прецизійного сільськогосподарства, наукових та популярних джерел інформації, зосереджена увага на системах машинного спостереження - стереозір. Створення автономних комплексів технічних засобів для реалізації технології машинного зору дозволить: спростити та зменшити вартість впровадження технологій точного землеробства на дрібних підприємствах; локалізувати обчислювальні потужності на мобільному сільськогосподарському обладнанні; забезпечити поетапну реалізацію (автономне визначення ситуації, централізований моніторинг, облік врожайності та палива, моніторинг роботи персоналу). У статті наведено алгоритм визначення позиції спостерігача (машино-тракторного агрегату) з використанням реперних точок відхилення, адаптованих до умов сільськогосподарських підприємств, площа яких сягає 500 га, а також для умов закритого ґрунту. Послідовність визначення відстані до спостерігача на основі стереозору наступна: створення реєстру реперних точок; визначення відстані від спостерігача до принаймні двох реперних точок (відстань до камер спостереження; відстань до середини стереопарної бази); визначення координат спостерігача. Подальша робота спрямована на визначення вимог до мапи поля, що обґрунтовує параметри реєстру реперних точок залежно від поля та умов точності позиціонування.

Ключові слова - **точне землеробство, стереозір, визначення положення, мапа, відкритий ґрунт, закритий ґрунт.**

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Агропромисловий комплекс вимагає бюджетних та ефективних рішень, які сприяють підвищенню рентабельності бізнесу – системи точного землеробства (ТЗ). За допомогою спеціального обладнання поліпшується точність і підвищується ефективність виконаних робіт [1]. Економічний ефект від впровадження ТЗ настає завдяки економії природних і промислових ресурсів, а також ефективного використання робітників і техніки



[2, 3]. ТЗ опосередковано позитивно впливає на ґрунтову родючість і сприяє екологічній чистоті продукції.

ТЗ реалізується за допомогою сучасних технологій – супутникових даних, дронів, курсовказівників або зі звичайними приладами GPS, на підставі яких формуються контури і площі полів, детальні ортофотоплани, матриці рельєфу, контролюється траєкторія руху машино-тракторних агрегатів [1]. Ряд особливостей сучасного ТЗ зумовлює його використання у великих господарствах, які сплачують роботу висококваліфікованих кадрів. Компанія SmartFarming [1] у переліку своїх клієнтів здебільшого має господарства із земельним банком більше 10 000 га (за даними державної служби статистики України таких підприємств станом на 2017 рік 166 або 0,4% від загальної кількості сільськогосподарських підприємств [4]). Слід відзначити, що сільськогосподарські підприємства з площею від 20 га до 500 га складають 51,7 % [4], такі підприємства вимагають більш дешевих рішень, які реалізують елементи ТЗ.

Основними рушійними факторами ТЗ стали [1, 2]: надійні і високопродуктивні засоби механізації; стрімке поширення електроніки та інформаційних технологій; наявність цивільного доступу до технічних засобів та програмного забезпечення глобальних систем позиціонування.

Поширені способи реалізації ТЗ та завдання базуються на використанні технічних засобів, які мають достатньо високу вартість та мають певні особливості при впровадженні у роботу господарства (додатково впроваджується хмарне зберігання даних, програмне забезпечення для багатокористувацького доступу до даних) [2, 3]. За даними сайтів з продажу такого обладнання (prom.ua, olx.ua, agrometer.com.ua) вартість, станом на вересень 2018 рік, мінімальної системи заміру поля складає 7,5 тис. грн. (не враховуються вимоги до надійності обладнання). Система більш повної функціональної комплектації - від 15 тис. грн. При визначенні вартості обслуговування необхідно враховувати вартість сервісу використання GPS. Саме тому, використання елементів ТЗ в умовах України [1] поширене серед крупних товаровиробників із великим парком сільгосптехніки, які працюють в умовах відкритого ґрунту. Перспективи розширення ринку збуту такої системи полягають спрямованості на дрібні підприємства, та адаптацію до роботи у відкритому та закритому ґрунтах, що суттєво розширює ринок збуту технічних засобів та програмних продуктів. Отже, постає завдання розробки локальної системи точного землеробства для дрібного товаровиробника.

Формулювання цілей статті. Обґрунтувати спосіб визначення положення мобільної техніки в умовах дрібних виробників продукції рослинництва, за умови мінімізації витрат на обслуговування системи

ТЗ, шляхом скорочення витрат на доступу до системи глобального позиціонування, а також технічну та інформаційну локалізацію.

Виклад основного. Серед відомих способів визначення положення об'єктів можна виділити: на основі GSM, радіолокаційні станції, системи машинного зору. У результаті аналізу ринкових пропозицій для впровадження, наукових та науково-популярних джерел, акцентовано увагу на системах машинного зору (МЗ).

Вивчення стану питання дозволяє розглядати можливість позиціонування робочих машин на основі роботи однієї [5, 6], двох та більше камер відеоспостереження (web-камера, IP-камера, екшн-камера) [5, 7, 8, 9]. Відомі роботи, які підкреслюють доцільність та перспективність МЗ у розв'язанні задач позиціонування сільськогосподарської техніки на полях [10]. Напрацювання закордонних вчених мають практичні результати для використання МЗ в умовах відкритого ґрунту: визначення перепон на траєкторії руху тракторного засобу [9, 11]; визначення параметрів якості роботи розкидача добрив [12]; якість проростання рядів та їх ідентифікація для автопілоту [13]; оцінка стану рослин [14] та ін.

У бінокулярній системі відстань L між камерами постійна (рис. 1) [5, 14]. Цю відому величину можна використати для визначення відстані та координат спостерігача, що відповідає задачам автономної навігації та картографування мобільних роботів [7, 13]. На рис. 1 схематично показана бінокулярна система, яка містить камери 1 та 2 з паралельною оптичною віссю та однаковими фокусними відстанями F_1 та F_2 , які, у певних випадках, можуть відрізнятись.

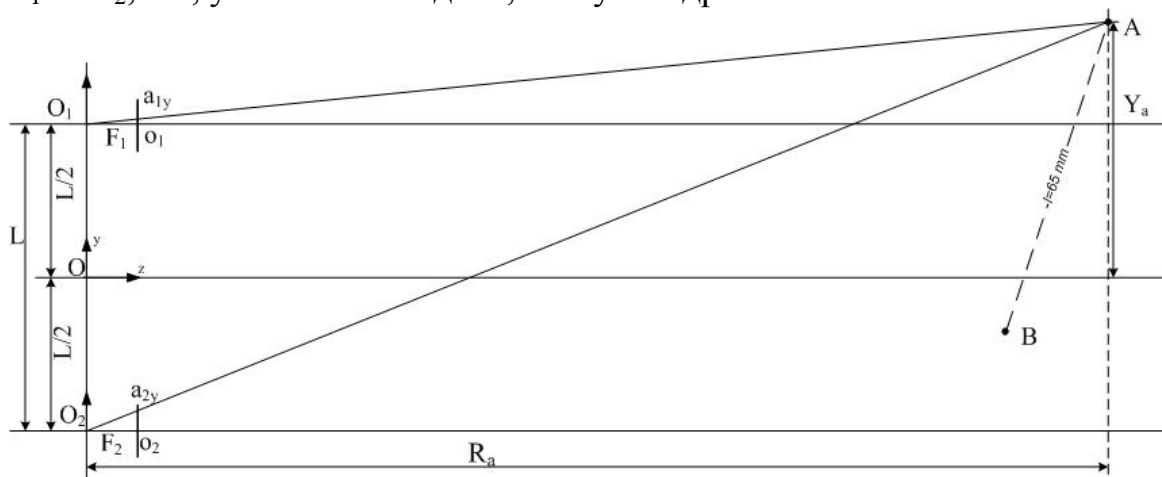


Рис. 1. Схема бінокулярного визначення відстані

Припустимо, на матрицях камер 1 та 2 отримані зображення $\bar{a}_1 = (a_{1x}, a_{1y})$ та $\bar{a}_2 = (a_{2x}, a_{2y})$ точки А. З-за різного положення камер у просторі отриманні зображення точки А мають різні положення.

Для визначення відстані по віссі Y , використовуємо додаткове позначення t_{a1} та t_{a2} – тангенс кута сприйняття точки А матрицями ка-

мер 1 та 2 відповідно по віссі Y . Визначаємо ці тангенси з геометричної подоби трикутників при виконанні пропорцій [5]:

$$\begin{cases} t_{1y} = \frac{o_1 a_{1y}}{F_1} = \frac{O_1 A}{R} = \frac{y_a - L/2}{R} \\ t_{2y} = \frac{o_2 a_{2y}}{F_2} = \frac{O_2 A}{R} = \frac{y_a + L/2}{R} \end{cases} \quad (1)$$

Рішення даної системи має вигляд [5]

$$y_A = \frac{L \cdot (t_{1y} + t_{2y})}{2 \cdot (t_{2y} - t_{1y})} \quad (2)$$

$$R = \frac{L}{t_{2y} - t_{1y}} \quad (3)$$

З отриманих даних можна визначити координату x_a

$$x_a = R \frac{o_1 a_{1x}}{F_1} = R \frac{o_2 a_{2x}}{F_2} \quad (4)$$

Спосіб визначення відстані можна представити через визначення кутів трикутника (рис. 2), сторони якого відповідають відстані до об'єкту та між камерами спостереження [5], в основі якого також буде система рівнянь (1).

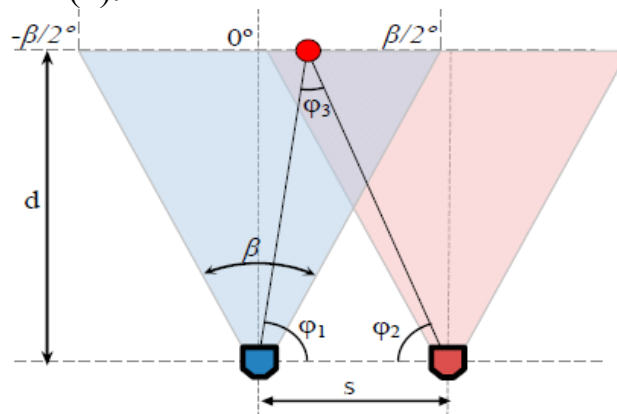


Рис. 2. Схематичне представлення визначення відстані до об'єкту на основі системи стереозору

$$d = \left| \frac{s \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2}{\sin \varphi_3} \right| \quad (5)$$

де d – відстань до об'єкта;

φ_1, φ_2 – відповідні кути між базою камер та відрізками між центром камери та об'єктом;

φ_3 – кут, який утворюється відрізками відстані від об'єкту до камер спостереження.

Визначення багатовимірних показників відстані, за допомогою яких можливо визначити і параметри об'єкта спостереження або рельєф поля, можливо за допомогою вектору положення у вигляді [15]

$$\vec{\rho} = \begin{bmatrix} \rho_x \\ \rho_y \\ \rho_z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \rho_m^x \\ \rho_m^y \\ \rho_m^z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\rho_x \\ \Delta\rho_y \\ \Delta\rho_z \end{bmatrix} = \vec{\rho}_m + \Delta\vec{\rho} \quad (6)$$

де $\vec{\rho}_m$ - вектор перетворень вимірювань;

$\Delta\vec{\rho}$ - вектор адитивної помилки.

Відповідно до поставленого завдання, отримання інформації про положення точки А не надає можливість визначення координат спостерігача (рис. 3). Для цього, за аналогічним принципом визначимо відстань до точки В.

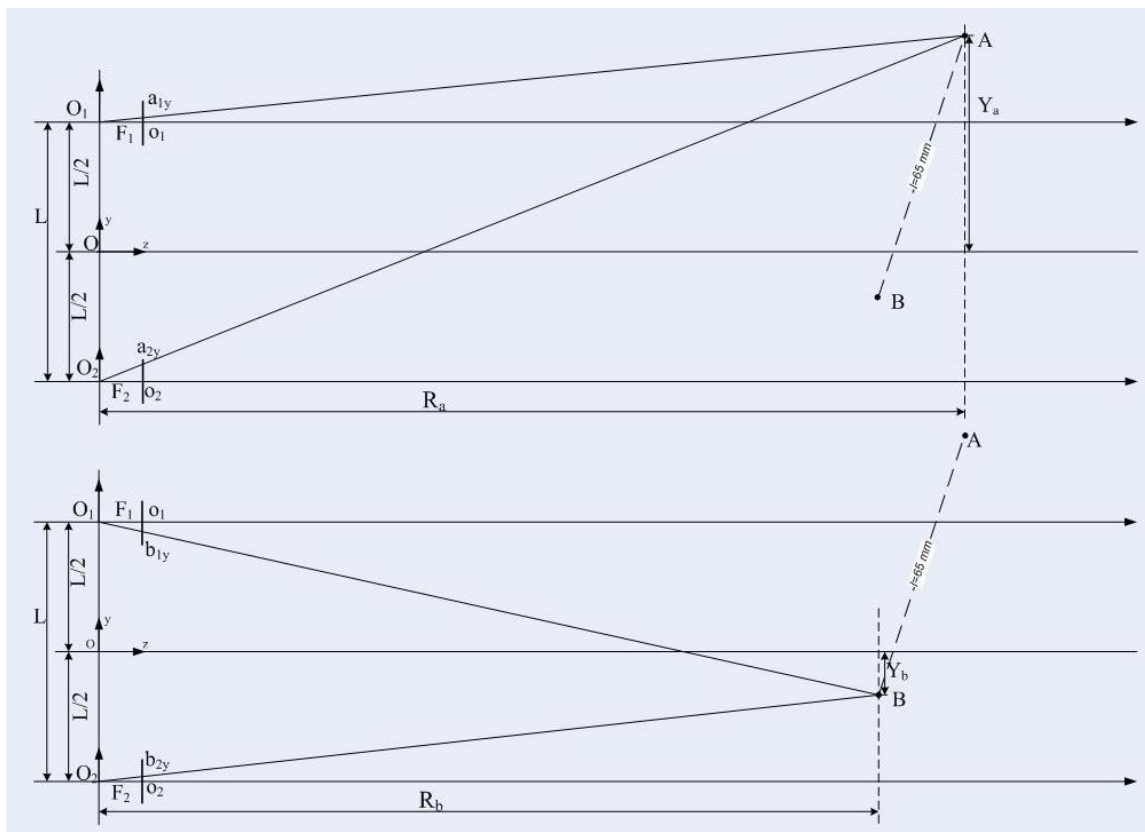


Рис. 3. Схема визначення відстані між двома точками

Для визначення координат точки О (спостерігача) необхідно визначити довжину ОА та ОВ – медіан відповідних трикутників. За відомими формулами їх довжина визначається за виразами:



$$R_{OA} = OA = \frac{1}{2} \sqrt{2(O_1A)^2 + 2(O_2A)^2 - L^2} \quad (7)$$

$$R_{OB} = OB = \frac{1}{2} \sqrt{2(O_1B)^2 + 2(O_2B)^2 - L^2} \quad (8)$$

Визначимо значення відстаней O_1A , O_2A , O_1B та O_2B

$$O_1A = \frac{R_a}{\cos \left(\arctg \frac{F_1}{o_1a_{1y}} \right)} \quad (9)$$

При відомих координатах на мапі точок $A(r_a, y_a)$ та $B(r_b, y_b)$, задача визначення координат точки O (спостерігача) зводиться до визначення координат вершини трикутника з відомими відстанями OA та OB . Що можливо при розв'язання системи рівнянь

$$\begin{cases} R_{OA} = \sqrt{(r_a - r_o)^2 + (y_a - y_o)^2} \\ R_{OB} = \sqrt{(r_b - r_o)^2 + (y_b - y_o)^2} \end{cases} \quad (10)$$

Виконаємо перетворення

$$\begin{cases} R_{OA}^2 = r_a^2 - 2 \cdot r_a \cdot r_o + r_o^2 + y_a^2 - 2 \cdot y_a \cdot y_o + y_o^2 \\ R_{OB}^2 = r_b^2 - 2 \cdot r_b \cdot r_o + r_o^2 + y_b^2 - 2 \cdot y_b \cdot y_o + y_o^2 \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 4 наведена імітаційна модель розв'язання системи рівнянь з використанням Simulink. Роботу моделі та точність розрахунків перевіряємо на прикладі рис. 5. Припускаємо, що точка A та B мають статичні координати (рис. 5). Точка має умовно невідомі координати $O(r_o, y_o)$. Відстані R_a та R_b визначаються за властивостями прямих, які відображаються у параметрі «довжина» (рис. 5). Отриманні значення координат, які відображені в модулях Display r_o та y_o (рис. 4) відображають місцезнаходження точки « O » - дійсне положення спостерігача.

Слід зазначити, що представлена методика визначення положення за опорними точками може бути використана в умовах закритого ґрунту, що дозволить розширити інформативність мобільних роботів та спростити їх навігацію у теплиці.

Висновки. Створення комплексів технічних засобів для реалізації технології МЗ дозволить розв'язати поставлені завдання, а саме: спростити та знизити собівартість впровадження систем ТЗ, локалізувати обчислювальну потужність на мобільній техніці, забезпечити поетапне впровадження (автономне визначення положення; централізоване спостереження; облік врожайності та палива; контроль роботи

персоналу). Розроблений алгоритм визначення положення з використанням мапи опорних точок адаптований до умов дрібного виробника.

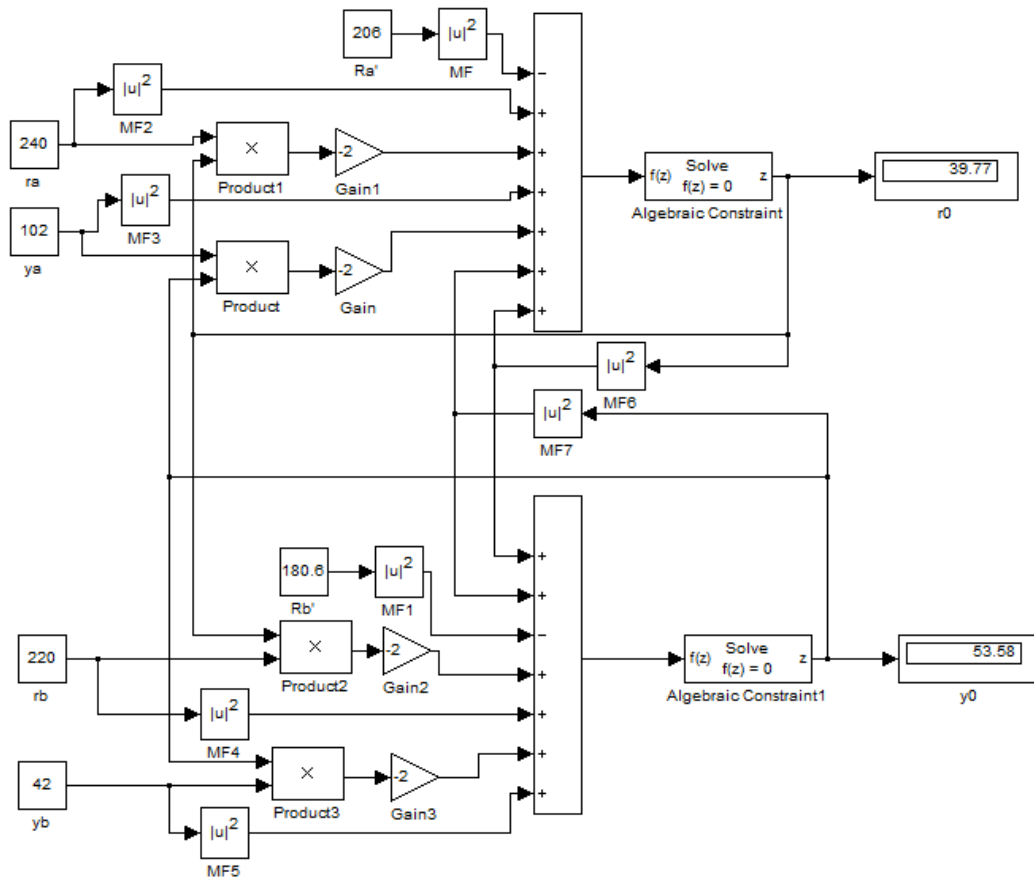


Рис. 4. Імітаційна модель розв'язання системи рівнянь (11) визначення координат спостерігача з використанням Simulink

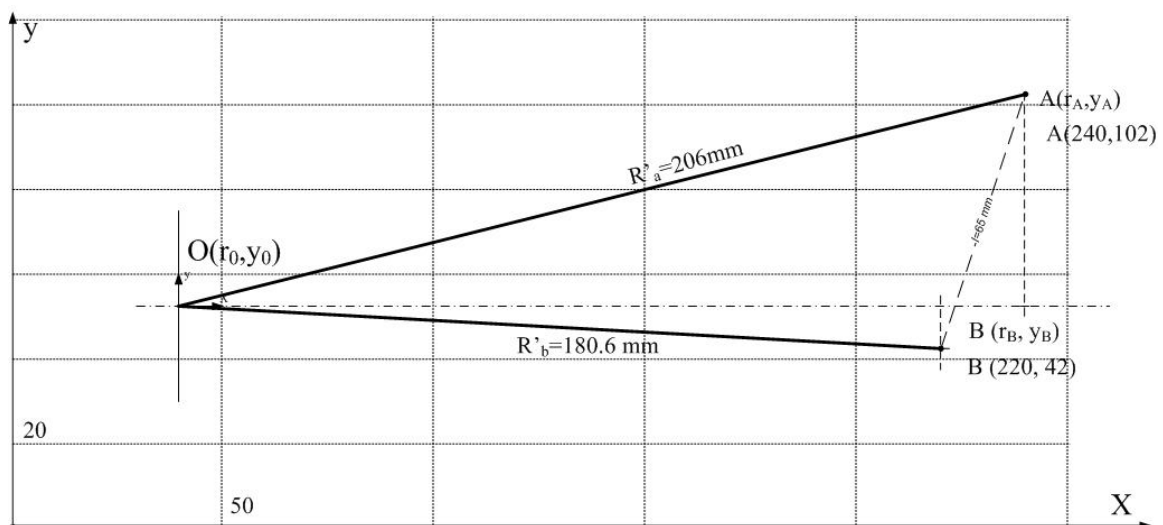


Рис. 5. Схема визначення координат спостерігача у декартовій системі координат

Методика визначення положення спостерігача на основі стереозору:



1. Створення мапи опорних точок;
2. Визначення відстані спостерігача до щонайменше двох опорних точок:
 - а. відстань до камер спостереження;
 - б. відстань до середньої точки бази;
3. Визначення координати спостерігача.

Слід зазначити, що представлена методика визначення положення за опорними точками може бути використана в умовах закритого ґрунту, що дозволить розширити інформативність мобільних робіт та спростити їх навігацію у теплиці.

Подальша робота спрямована на визначення вимог до мапи поля, обґрунтування розміру бази камер в залежності від мапи опорних точок та вимоги до точності визначення положення.

Література

1. SmartFarming. Офіційна сторінка [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://smartfarming.ua>.
2. Броварець О. Клас інформаційно-технічних систем локального оперативного моніторингу [Електронний ресурс] / О. Броварець // Агробізнес сьогодні. – 2018. – 28 серпня. – Режим доступу: <http://agro-business.com.ua>
3. Циганенко М. Система точного землеробства економить ваші гроші / М. Циганенко, М. Макаренко, М. Макаренко // Пропозиція. – 2017. – № 5. – С. 56-60.
4. Сільське господарство України. Статистичний збірник. 2017 рік. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publ7_u.htm
5. Сайтова Я. А. Точность распознавания расстояний до объектов в системах технического зрения / Я. А. Сайтова, Н. И. Гданский // Известия ВолгГТУ. – 2014. – С. 174-177.
6. Стрельцов О. В. Методы определения расстояния до препятствия при движении мобильного робота / О. В. Стрельцов, А. О. Даниленко // Праці Одеського політехнічного університету. – Вип. 2(41). – Одеса, 2013. – С. 238-241.
7. Font, D., Pallejà, T., Tresanchez, M., Runcan, D., Moreno, J., Martínez, D., ... Palacín, J. (2014). A Proposal for Automatic Fruit Harvesting by Combining a Low Cost Stereovision Camera and a Robotic Arm. *Sensors*, 14(7), 11557-11579. <https://doi.org/10.3390/s140711557>
8. Faisal, M., Mathkour, H., Alsulaiman, M., & Zuair, M. (2016). Multi-sensors multi-baseline mapping system for mobile robot using stereovision camera and laser-range device. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(6), 1–18. <https://doi.org/10.1177/1687814016654634>.



9. Reina, G., & Milella, A. (2012). Towards Autonomous Agriculture: Automatic Ground Detection Using Trinocular Stereovision. *Sensor*, 12, 12405-12423. [https:// doi:10.3390/s120912405](https://doi.org/10.3390/s120912405).
10. Личман Г. И. Применение систем технического зрения в точном земледелии [Электронный ресурс] / Г. И. Личман, И. Г. Смирнов, А. И. Беленков // Нивы России. – 2017. – № 4 (148). – Режим доступа: <http://svetich.info>.
11. Steen, K. A., Therkildsen, O. R., Green, O., & Karstoft, H. (2015). Detection of Bird Nests during Mechanical Weeding by Incremental Background Modeling and Visual Saliency. *Sensors*, 15(3), 5096-5111. <https://doi.org/10.3390/s150305096>.
12. Cool, S. R., Pieters, J. G., Seatovic, D., Mertens, K. C., Nuyttens, D., Van De Gucht, T. C., & Vangeyte, J. (2017). Development of a Stereovision-Based Technique to Measure the Spread Patterns of Granular Fertilizer Spreaders. *Sensors*, 17, 1396-1403. [https:// doi:10.3390/s17061396](https://doi.org/10.3390/s17061396).
13. Pajares, G., García-Santillán, I., Campos, Ye., Montalvo, M., Guerrero, J. M., Emmi, L., ... Gonzalez-de-Santos, P. (2016). Machine-Vision Systems Selection for Agricultural Vehicles: A Guide *J. Imaging*, 2(34). [https:// doi:10.3390/jimaging2040034](https://doi.org/10.3390/jimaging2040034)
14. Kise, M., & Zhang, Q. (2008). Creating a panoramic field image using multi-spectral stereovision system. *Computers and electronics in agriculture*, 60(1), 67–75. [https:// doi:10.1016/j.compag.2007.07.002](https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.07.002)
15. Shtark, T., & Gurfil, P. (2017). Tracking a Non-Cooperative Target Using Real-Time Stereovision-Based Control: An Experimental Study. *Sensors*, 17(4), 735. [https:// doi:10.3390/s17040735](https://doi.org/10.3390/s17040735)

ЛОКАЛЬНАЯ СИСТЕМА ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ СТЕРЕОЗРЕНИЯ

Кашкарёв А. А.

Аннотация

Проанализирована актуальность систем точного земледелия в современных условиях сельскохозяйственных предприятий Украины. На основании анализа структуры земель сельскохозяйственных предприятий принято решение рассматривать на предприятия Украины с площадью от 20 до 500 га (по состоянию на 2017 год, таких предприятий, осуществляющих сельскохозяйственную деятельность в сфере растениеводства, 51,7 %). Этим предприятиям требуются дешевые решения, которые реализуют элементы точного земледелия. В результате анализа предложений рынка, примеров внедрения точного земледелия, научных и популярных источников информации, в статье акцентировано внимание на системах машинного зрения - стереозрение. Разработка комплексов технических средств для реализации технологии машинного зрения позволит: упростить и удешевить внедрение технологий точного земледелия на малых предприятиях; локализовать вычислительные мощности на мобильной технике; обеспечить поэтапное внедрение (автономную работу; централизованный мониторинг; учет урожайности и



расхода топлива; контроль работы персонала). В статье показан алгоритм определения местоположения наблюдателя (машинно-тракторного агрегата) с использованием карты реперных точек. Алгоритм адаптирован к условиям сельскохозяйственных предприятий, площадь которых составляет до 500 га, а также можно использовать для тепличных хозяйств. Представлен метод определения расстояния до наблюдателя на основе стереозвуча: создание карты реперных точек; определение расстояния от наблюдателя по меньшей мере к двум опорным точкам (расстояние до камер наблюдения; расстояние до средней точки основания стереопары); определение координат наблюдателя. Дальнейшая работа направлена на определение требований к полевой карте, обоснование размеров базы камеры в зависимости от карты реперных точек на поле и условий точности позиционирования.

LOCAL SYSTEMS OF PRECISION AGRICULTURE BASED ON STEREOVISION

A. Kashkarov

Summary

Analyzed the relevance of precision farming systems in the modern conditions of agricultural enterprises of Ukraine. Based on the analysis of land of agricultural enterprises structure accented attention to enterprises with an area of 20 hectares to 500 hectares. They constitute 51.7% of enterprises that carry out agricultural activities in the field of crop production. These enterprises require a cheap engineering solutions that implement elements of precision farming. An analysis of the market proposals for the implementation of precision agriculture, scientific and popular sources of information, focusing on machine vision systems – stereovision. The creation of complexes of technical means for the implementation of machine vision technology will allow: to simplify and reduce the cost of introducing precision farming technologies; localize computing power on mobile agricultural equipment; provide a phased implementation (autonomous determination of the situation; centralized monitoring; accounting of crop yields and fuel; monitoring the work of the staff). The article shows the algorithm determining the position of the observer (vehicle-tractor unit) using reference point map that is adapted to the conditions of the agricultural enterprises, area which cater to 500 m, and for greenhouse facilities. A method for determining the distance to the observer based on stereo vision is presented: the creation of a map of reference points; determining the distance from the observer to at least two reference points (distance to the surveillance cameras; the distance to the midpoint of the stereo pair base); determining the coordinates of the observer. Further work is aimed at determining the requirements for the field map, justifying the size of the camera base, depending on the map of control points on the field and conditions for the accuracy of positioning.

Keywords: precision farming, stereos, location, map, open ground, closed soil.