

## УПРАВЛЕНИЕ НА АВТОНОМЕН МОБИЛЕН РОБОТ ПОСРЕДСТВОМ КАМЕРА ЗА ТЕХНИЧЕСКО ЗРЕНИЕ

Д. Славов

### AUTONOMOUS MOBILE ROBOT CONTROL USING MACHINE VISION CAMERA

D. Slavov

1000 София, бул. „Кл. Охридски“ 8, ТУ-София, бл. 9, катедра „Автоматизация на електрозадвижванията“, каб.: 9406, тел: (02) 965-3945, d.slavov@tu-sofia.bg

#### Abstract.

This paper describes an autonomous mobile robot system which finds a color illuminated opening in a vertical plane, moves frontally and passes through it. The system is constructed of a three-wheel platform, Arduino microcontroller and smart camera Pixy2 for machine vision. The mobile robot finds the frontal position by repeatedly measuring the opening width while maneuvering straight and diagonally towards it.

**Key words:** mobile robot, automatic control, computer vision, machine vision, Arduino, Pixy.

#### ВЪВЕДЕНИЕ

Мобилните роботи представляват комплексни системи, които може да съдържат множество различни сензори и изпълнителни механизми и се характеризират най-вече с програмируемо управление и адаптивност към непредвидимо обкръжение.<sup>[1]</sup> В настоящия доклад се разглежда метод за автономно придвижване на мобилна роботизирана платформа, която с помощта на смарт камера за техническо зрение намира отвор във вертикална равнина и преминава през него. Съществуват редица изследвания, свързани с приложението на този тип камери в комбинация с нискобюджетен микроконтролер, като например Arduino или Raspberry. Например за следене на линия и разпознаване на обекти с приложение при автономно управляемите автомобили<sup>[2]</sup>, следване на инвалидна количка от колесна платформа за пренасяне на багаж<sup>[3]</sup> и много други разработки, използващи функциите на разглежданата тук смарт камера за разпознаване на обособени цветни участъци и комбинации от такива.

Предложеното решение се отличава от съществуващите с това, че мобилният робот търси и намира оптимална по даден критерий позиция спрямо определена цел. Това се осъществява чрез установяване на промяната в ширината на целта с течение на времето. Освен това в системата не се използват никакви други сензори, като например за измерване на разстояние. Поради това тя е с ниска себестойност и опростена структура, но също така може да служи като базов модел за по-нататъшно надграждане и прецизиране на изпълняваните функции.

#### ИЗЛОЖЕНИЕ

##### ИЗПОЛЗВАНИ КОМПОНЕНТИ

За целите на настоящото изследване са използвани следните компоненти: микроконтролер Arduino Leonardo, кръгло шаси, към което са монтирани постояннокови

двигатели и монтирани към тях колела, интегрална схема L298N, серво платформа, камера Pixy2.

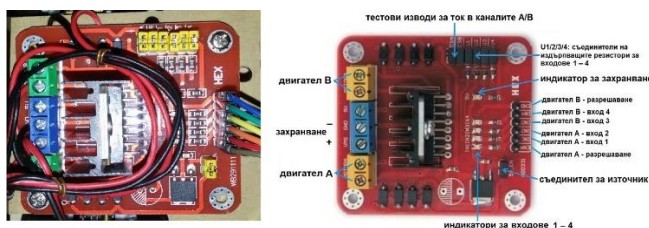
*Камера за техническо зрение.* CMUcam е устройство за компютърно зрение от нисък ценови клас, предназначено за изследвания в областта на роботиката. Състои се от малка видеокамера и микроконтролер със сериен интерфейс. Докато другите цифрови камери обикновено използват връзка с много по-широка честотна лента, опростеният интерфейс на CMUcam позволява то да бъде достъпно от микроконтролери. Освен това вграденят микропроцесор осигурява първично обработване на изображенията и проследяване на цветни региони. Устройството също така има изключително малък форм-фактор. Това също допринася за популярността му при направата на малки мобилни роботи. Първоначално се разработва от Университет „Карнеги Мелън“ (Carnegie Mellon University), а впоследствие лицензът се предоставя на различни производители.<sup>[5]</sup>

Петото поколение на изделията CMUcam (т.е. CMUcam5) е получило името Pixy, а използваното тук устройство е от версия 2, наречена Pixy2. В тази система видеопреработвател заснема изображения с кадрова честота 60 Hz, които се предават към вграденния микропроцесор, обработват се и резултатите се изпращат към свързания микроконтролер. Това може да става по различни комуникационни интерфейси: UART, I2C, USB<sup>[4]</sup>, както и използвания в разглежданата система SPI през порта ICSP (3 канала, реализирани чрез изводите 1, 3 и 4 на Arduino).

За откриване на обекти се използва алгоритъм, наречен цветово свързани компоненти (Color Connected Components, CCC), който реализира метода на етикетирание на свързаните компоненти (Connected Components Labeling) в цветни изображения.

Смарт камерата PiXu2 разполага с 6 (2 групи по 3) извода, чрез които самостоятелно може да управлява до 2 серво двигателя. Тази функция е използвана при построяването на платформата, като така се оползотворяват по-пълно възможностите на устройството и се опростява както схемата на свързване, така и софтуерната програма.

*L298N*. За превключване на постояннотоковите двигатели се използва електронна схема L298N (модел WB291111), реализираща двоен H-мост. Този драйвер може да приема сигнали за транзисторно-транзисторна логика (ТТЛ), чрез които да управлява индуктивни товари като релета, соленоиди, постояннотокови и стъпкови двигатели. Окомплектован е с два входа, които независимо разрешават или забраняват работата на всеки от двата двигателя. Има и допълнителен захранващ вход, така че логическото управление да се изпълнява при по-ниско напрежение.



**Фиг. 1.** Външен вид и означения на изводите в L298Np

Скоростта на въртене на двигателите се регулира чрез широчинно-импулсна модулация (ШИМ). Изводите 9 и 10 на Arduino подават разрешаващи сигнали към входовете ENB и ENA съответно за левия и десния двигател. Числовата стойност в диапазона [0, 255] съответства на продължителността на импулса  $t_{импулс}$  чрез следното отношение:

$$\frac{t_{импулс}}{T} = \frac{PIN}{PIN_{макс}} \quad (1)$$

където  $PIN$  и  $PIN_{макс}$  са съответно текущата и максималната (255) стойност, подавана на извода.

Периодът е определен от тактовата честота, с която работят съответните изводи: в случая 490 Hz, т. е.  $T \approx 2 \text{ ms}$ . Ако подадената стойност на извода е например 100, тогава

$$t_{импулс} = \frac{100 \cdot 2}{255} \approx 0,8 \text{ ms}$$

и съответно  $t_{пауза} = T - t_{импулс} \approx 1,2 \text{ ms}$ .

На практика, поради преодоляване на загубите в използваните двигатели (те не се завъртат при стойности на извода, по-малки от 40), минималният коефициент на запълване D е около 16%.

#### НЯКОИ ИЗПОЛЗВАНИ В PIXU2 МЕТОДИ ЗА ОБРАБОТКА НА ИЗОБРАЖЕНИЯ

*Преобразуване RGB – HSV*. Филтриращите методи във основа на цвета са широко използвани, тъй като са бързи, ефикасни и сравнително устойчиви. Изображението се конвертира от цветовия модел RGB (red, green, blue – червено, зелено, синьо) към HSV (hue, saturation, value – цвят, наситеност, стойност). По същество пространството HSV представлява проекция на цветовия куб RGB върху нелинеен хроматичен ъгъл, процент на радиално насищане (сатурация) и стойност на яркостта. Това декомпозиране има за цел да раздели данните за яркостта от тези за цвета и да приближи изображението към по-лесни за възприемане цветови модели. Например ако даден

алгоритъм за компютърно зрение трябва да въздейства само върху стойността (яркостта) на изображението, но не върху насищането или цвета му, едно просто решение би било използването на цветовите отношения

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad (2)$$

След манипулиране на яркостта, напр. посредством изравняване на хистограми, всеки цвят може да се умножи с отношението на новата спрямо старата яркост, за да се получи коригирана тройка от червено, зелено и синьо.<sup>[6]</sup>

Изчислените стойности за цвета и наситеността на всеки пиксел, получен от преобразувателя, се използват като параметри на филтриране. Това цели запазване на постоянен цвят на обекта дори при различно ниво на осветеност и експозиция.<sup>[4]</sup>

Действието на камерата PiXu 2 при изпълнение на програмата за цветово свързани компоненти използва цвета на обектите вместо тяхната яркост. Той се формира в две измерения U и V:

$$U = \frac{R-G}{R+G+B}, \quad V = \frac{B-G}{R+G+B} \quad (3)$$

където  $R$  – червен,  $G$  – зелен,  $B$  – син цвят. След това се определят границите на  $U$  и  $V$ , с които е свързан даден обект. Тъй като при този метод се дели на сумата от всички цветни пиксели, яркостта в голяма степен се пренебрегва и това намалява влиянието на промените в осветеността.<sup>[7]</sup>

*Етикетирание на свързаните компоненти*. При този метод изображението се сканира и пикселите в него се групират в компоненти съобразно свързаността си, т.е. всички пиксели в един свързан компонент имат близък по стойност интензитет и по някакъв начин са свързани помежду си. След определяне на групите всеки пиксел получава „етикет“, представляващ ниво на сиво или цвят (цветово етикетирание) съгласно компонента, към който принадлежи.<sup>[8]</sup>

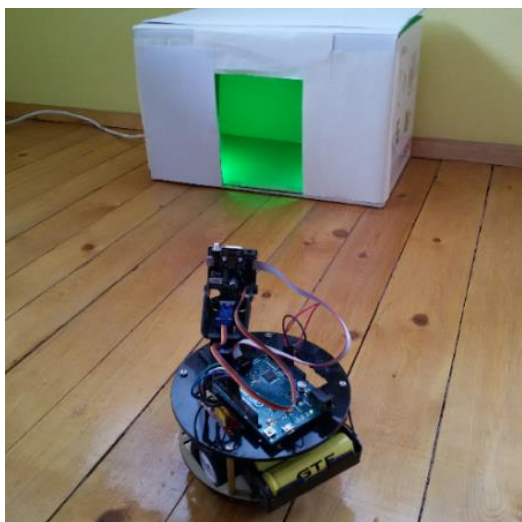
#### НАСТРОЙВАНЕ НА КАМЕРАТА

Конфигурирането на цветни сигнатури се извършва чрез софтуера PiXuMon. В него може да се определят и запишат до 7 различни цвята и когато камерата установи участък от зрителното си поле, отговарящ на вече конфигуриран цвят, тя го разпознава като т.нар. блок (block). Текущо откритите блокове се записват в масив от обекти, всеки от които съдържа следните данни: пореден номер на сигнатурата (т.е. на уникалния цвят, от който е съставен блокът), координати по  $x$  и по  $y$  (изразени като пиксели по ширина и височина на зрителното поле) на центъра на блока, ширина и височина на блока (отново в пиксели), индекс на блока и брой поредни кадри (от 0 до 255), в които блокът е присъствал.

#### ОПИТНА ПОСТАНОВКА

Опитната постановка представлява кутия във формата на правоъгълен паралелепипед с изрязан в нея отвор, който е с приблизително същата ширина като тази на мобилната платформа. Височината е достатъчна, за да може платформата да премине, но конкретната ѝ стойност няма значение, тъй като не участва в изчисляването на траекторията.

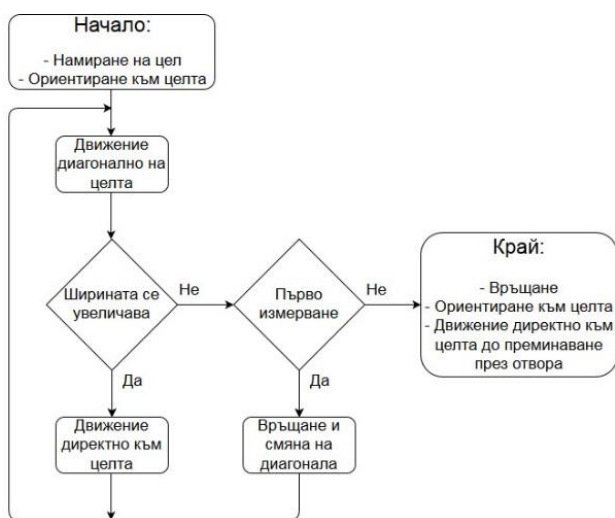
Във вътрешността на кутията е монтирано осветление със зелен цвят и достатъчна яркост. Кутията е поставена върху равната повърхност, по която се придвижва мобилната платформа.



Фиг. 2. Външен вид на мобилната платформа и отвора

### АЛГОРИТЪМ

Чрез разработения метод мобилният робот сам установява местоположението на отвора, заема фронтална спрямо него позиция и приближавайки се, преминава през него. За да може да премине през отвора, роботът най-напред трябва да застане фронтално, защото в противен случай ширината на отвора няма да е достатъчна. Търсенето на фронтална позиция (ФП) се осъществява чрез многократна последователност от: 1) придвижване под ъгъл диагонално спрямо целта и 2) придвижване директно към целта. Първата част от тази последователност осигурява приближаване към ФП, а втората компенсира ситуации, в които роботът едновременно се отдалечава от ФП и се приближава към целта – в такъв случай ширината на отвора няма да намалява и отдалечаването от ФП няма как да бъде установено. Критерий за доближаване до ФП е отчетеното от камерата увеличаване на ширината на отвора по време на диагоналното придвижване: ширината се измерва веднъж преди началото на движението и втори път след края му, като двете стойности се сравняват. Последователността 1 – 2 се изпълнява, докато е налице приближаване към ФП.



Фиг. 3. Блок-схема на алгоритъма за намиране на отвор и фронтална позиция

Първият етап от алгоритъма е намиране на целта (отвора в кутията) и ориентиране на шасито с предната си част към нея. Следващият етап цели достигане на ФП: многократна

последователност от движение по диагонал спрямо целта (за определено време) и движение директно към целта (също за определено време). След намиране на ФП започва финалният етап – придвижване към целта за определено време до преминаване през отвора. Ако обаче след първото придвижване по диагонал се окаже, че целта се стеснява, то е необходимо да бъде избран обратният диагонал.

Първоначално мобилният робот започва да търси отвор (цел), като серво платформата, върху която е разположена камерата Рixу2, застава в централно положение (90 градуса), а колелата започват да се въртят с максимална скорост – лявото напред, а дясното назад. Така роботът реализира въртене надясно около мислената ос в центъра на шасито си. Щом камерата открие участък, осветен в предварително зададения цвят, значи целта е намерена – тъй като този участък на практика изобразява отвора в кутията. Следва ориентиране на шасито с предната си част към целта.

В този момент посоката на целта вече е намерена, но все още не е известно дали роботът би могъл да премине през отвора, ако тръгне директно към него – т.е. не се знае дали е разположен фронтално. Затова се измерва и регистрира ширината на отвора, шасито се завърта на място под определен ъгъл и се придвижва напред за определено време (като независимо от това, камерата продължава да следи целта). Отново се измерва ширината и двете се сравняват. Ако по-късно измерената ширина е по-голяма, значи е налице приближаване към целта, приближаване към ФП или и двете. Последователността от движение по диагонал и директно към целта се повтаря, докато в даден момент (след първото измерване) се окаже, че по-късно измерената ширина е по-малка от по-рано измерената. Това означава, че роботът току-що е подминал ФП и е започнал да се отдалечава от нея. В такъв случай се извършва придвижване назад за определено време, което действие приблизително съответства на връщане във ФП. От тази позиция роботът се насочва към отвора и започва да се движи напред, докато премине през него.

След първото диагонално придвижване, ако се установи, че роботът се е отдалечил от целта, това означава, че първоначално избраният диагонал е неподходящ и трябва да се избере обратният. Затова роботът, без да променя ориентацията си, се връща назад за определено време, ориентира се към целта (т.е. застава в изходно положение) и отново се завърта под същия ъгъл, но в противоположна посока – която ще се използва и до края на програмата.

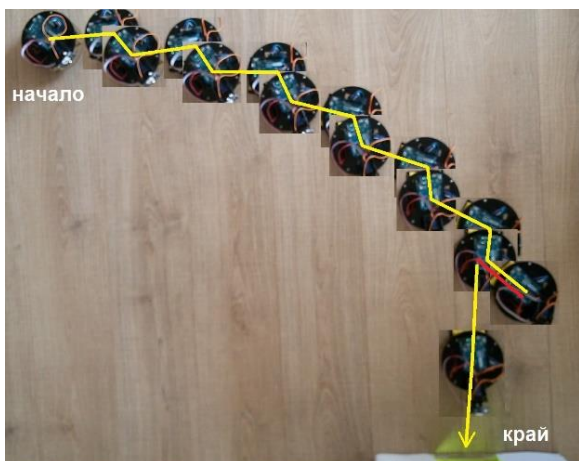
### ОПИСАНИЕ НА ИЗВЪРШЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ И АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Мобилната система е изпробвана при няколко начални положения, различаващи се по отдалечеността си спрямо целта и ФП. По време на експериментите не беше достигнато максималното разстояние, до което камерата открива цветния участък, и следователно не възникнаха свързани с това затруднения.

Когато началното положение е твърде далеч от целта, не е обосновано веднага да започне търсене на ФП, защото то ще бъде по-неточно, отколкото от близко разстояние, и освен това ако роботът застане във ФП много далече от отвора, по време на финалното си придвижване има по-силни предпоставки правилната му траектория да се наруши – например поради неравности по пътя и нееднакви (въпреки заданието) скорости на левия и десния двигател. Тези смущения имат по-слабо влияние, когато финалното придвижване започва близо до целта.

В зависимост от разстоянието до целта и до ФП, както и от ъгъла, който шасито сключва с оста на ФП по време на диагоналното движение, са възможни ситуации, при които роботизираната платформа едновременно се приближава към целта и се отдалечава от ФП. Когато увеличаването на видимата ширина вследствие на приближаването към целта е по-голямо или равно на намаляването ѝ вследствие на отдалечаването от ФП, измерената ширина няма да намалява и роботът ще продължи да се движи в неправилна посока. За компенсирание на тези ситуации в алгоритъма е въведена стъпката за движение директно към целта, която служи и за промяна на ъгъла, сключен между шасито и оста на ФП.

На фиг. 3 е показана траекторията (в жълто), по която платформата се придвижва към целта си. С червено е означено връщането след подминаване на отчетената ФП.



Фиг. 3. Траектория на движението

При програмното реализиране на алгоритъма са отчетени ограниченията, свързани с размера на зрителното поле на камерата Pixy2 – 316 x 208 пиксела. В случаите, когато роботизираната система завива, ако това става прекалено бързо или движението на серво платформата е прекалено бавно, камерата ще загуби следения обект. За намаляване на тези ситуации е съобразена скоростта на завиване, както и бързодействието на серво управлението, реализирано софтуерно като ПД звено.

Използването на самостоятелен светлинен източник, благодарение на който от отвора се излъчва светлина с постоянен интензитет, позволява на системата да работи в широки граници на изменение на околното осветление. Затруднения основно възникват при наличие на друг светлинен източник (напр. силна дневна светлина от прозорец), разположен зад обекта, както и на гладки повърхности, в които достатъчно силно се отразява светлината от обекта, и следователно такива постановки следва да се избягват.

За експериментите е избрано осветяване на отвора със зелен цвят, тъй като наличието на този цвят в околните обекти на конкретната опитна постановка е най-малко. Така системата в голяма степен се предпазва от откриване на нежелана цел в началното положение или евентуално след изгубване на планираната цел. Също така осветеността на отвора се регулира чрез прегради, поставени в кутията, за да се постигнат граници и размер на регистрирания от камерата обект, които най-точно съответстват на действителния отвор.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведените експерименти показват, че представената в настоящия доклад система може успешно да се използва за насочване на мобилен робот към отвор във вертикална равнина, например в стена или между други обекти. Тя би могла да намери приложение като част от насочването на транспортни роботи в среда с пространствени ограничения, автономно паркиране на електрически превозни средства и др.

Изграждащите компоненти са нискобюджетни, което прави системата икономически ефективна. Самата смарт камера е с много малки размери: 43 x 39 x 16 mm и тегло около 10 g. Това позволява да бъде окомплектована в ограничени пространства, например като вграден елемент от компактен мобилен робот. Тъй като не се разчита на персонален компютър (в ролята на хост) за обработване на изображенията, а този процес е интегриран в самото устройство, отпада необходимостта от предаване на данните към допълнителен обработващ модул и оттам – към изпълнителния механизъм.

Основен принос на разглежданото решение е възможността за получаване на представа за размера на дадена цел без използване на допълнителни сензори за разстояние, а единствено чрез геометрични пресмятания. Освен това, в конкретната разработка целта представлява отвор, а не твърдо тяло, и това би затруднило работата и/или влошило точността на често използваните сензори, като например инфрачервени и ултразвукови.

Въпреки гореизложеното, една от потенциалните възможности за бъдещо развитие на системата е именно включването на още сензори: например разположени на допълнителни ротационни платформи, за да се измерва най-близкото разстояние до стената, което на свой ред да помогне за оптимизиране на траекторията на придвижване. Също така в алгоритъма може да се включи информация за положението (или няколко поредни във времето положения) на серво механизма, носещ камерата Pixy2, и така да се получава по-добра представа за ориентацията на мобилната платформа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Христов В., Дурчев С., „Следене на траектория от мобилен робот zumo“, Годишник на ТУ-София, 2018, том 68, книга 3, 113-120стр., ISSN 1311-0829
2. Li, J.-H., Ho, Y.-S., Huang, J.-J., Line Tracking with Pixy Cameras on a Wheeled Robot Prototype, (2018) 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan, ICCE-TW 2018, art. no. 8448948
3. Ahmad, M.F., Rong, H.J., Alhady, S.S.N., Rahiman, W., Othman, W.A.F.W., Colour tracking technique by using pixy CMUcam5 for wheelchair luggage follower, (2018) Proceedings - 7th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2017, 2017-November, pp. 186-191
4. Документация на продуктите Pixy – <https://docs.pixycam.com>
5. CMUcam – <https://en.wikipedia.org/wiki/CMUcam>
6. Richard Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, September 3, 2010 draft © 2010 Springer
7. Форум за потребители и разработчици на продуктите Pixy – <https://discourse.pixycam.com/>
8. R. Fisher, S. Perkins, A. Walker and E. Wolfart, Connected Components Labeling, 2003 – <https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/label.htm>, адресите в интернет са достъпни на 22.08.2019 г.