



A Fast Warehouse Inventory Micro Aerial Vehicle System Equipped with Visual Guidance and Navigation Algorithm

H. Fahimi, A. Naghash*

Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: This paper is an attempt to integrate computer vision techniques and micro aerial vehicle guidance to design and optimize an automated mission performed by a light micro aerial vehicle such that automating the mission becomes reasonably more efficient than performing it manually. A system is provided for warehouse management using a micro aerial vehicle equipped with a front camera. Computer vision algorithms make it possible for the micro aerial vehicle to locate packages, verify the presence or absence of a specified package and list the entire warehouse inventory in a short time. An innovative method is provided to detect shelves and their packages by the camera image, which enables the system to instantly plan the shortest path for the micro aerial vehicle while performing a shelf inventory listing. Then, following the planned path completes the mission faster than conventional guidance methods. The guidance algorithm is designed such that the efficiency of automatic operations compared to human operations is significantly increased. The system is first simulated and then implemented and the test output data is provided. The tests indicate the success of the system in securing automated operations while decreasing mission time.

Review History:

Received: Dec. 28, 2020
Revised: Apr. 15, 2021
Accepted: Jul. 19, 2021
Available Online: Dec. 15, 2021

Keywords:

Computer vision
Micro aerial vehicle
Visual guidance
Warehouse robot
Path optimization

1. INTRODUCTION

In recent years, there has been a remarkable increase in research related to guiding and navigating Micro Aerial Vehicles (MAVs) to provide indoor services. One of these services is MAV-aided warehouse inventory. Reviews show that the MAV systems not equipped with cameras cannot perform such missions within indoor spaces. MAV-aided inventory operations include two significant parts: package identification and guidance. In some works, guidance is done with the help of non-visual sensors (such as Ultra-Wide Band (UWB) [1] or Inertial Measurement Unit (IMU) [2]). Mostly, package identification is made using a front camera to detect visual IDs ([3,4]). Some works are fully vision-based. The MAV guidance is done using additional visible markers (such as ground markers [5]) in these works. There is a lack of guidance considerations such as path optimization to save time or energy, like in Ref. [6].

This work aims to design and implement a warehouse inventory MAV system, somehow more efficient than the related works. The significant contributions of the present system are as follows:

- The whole operation is based on a cheap MAV with minimum primary requirements.
- Operations are entirely based on a single camera. There is no reliance on other sensors.
- The empty shelf cells are detected so that the path is optimized by passing through them.

*Corresponding author's email: naghash@aut.ac.ir

2. METHODOLOGY

The problem warehouse contains several shelves lined up sequentially parallel. Several boxes, each with an ID, are randomly placed in different shelf cells. The purpose is to list all box IDs and locations. It is necessary to place colored tags at the intersection of the vertical and horizontal shelf bars. Also, the minimum distance between the shelves must be such that there is no need for the MAV to move to scan the shelf.

The MAV takes off and is positioned at the optimal viewpoint (the shortest distance where there is no need to move to observe the entire shelf). After shelf inventory, it follows the shortest path through the empty cells to get to the optimal viewpoint in front of the next shelf. This continues until the package list is completed. During the mission, the computer vision algorithm provides the list and required feedback for guidance.

2.1. Computer vision algorithm

The packages are identified by ArUco marker IDs from the OpenCV computer vision library. The shelf identification process is performed by filtering the image to visualize only the objects with the color of cell intersection tags. Shelf detection is challenging when the MAV (camera) is oriented somehow relative to the shelf facade. In such cases, to distinguish the two front and back shelves, tags with an area ratio of less than a particular size concerning the largest tag in the image are removed. We use a stair classification (Fig. 1-b) instead



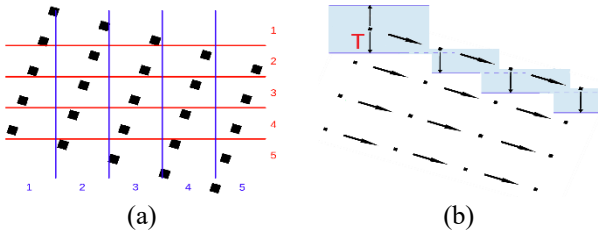


Fig. 1. (a) Normal classification and (b) Stair classification of a rotated point grid

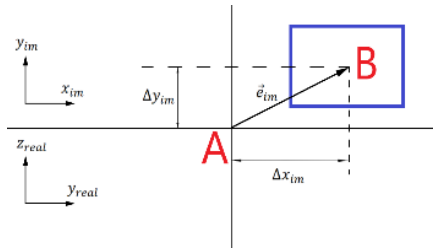


Fig. 2. The visual feedback for altitude and heading control

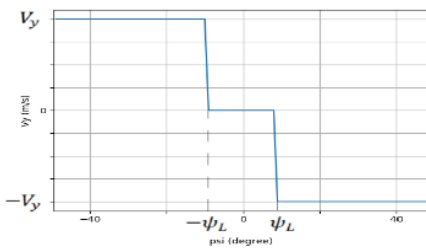


Fig. 3. y -direction velocity command in terms of the visually measured heading angle

of normal classification (Fig. 1-a) to categorize the tags in rows and columns. First, a fixed threshold for the maximum allowed vertical distance between two co-row tags is found (T in Fig. 1-b). Then, starting from one corner, the first co-row tag is found for each tag, and it goes on like visualized in Fig. 1-(b). The same goes for column categorization.

After a shelf inventory, the closest empty cell to the next shelf's optimal viewpoint is selected. The bounding rectangle of four corner tags of this cell is tracked in the following frames using the Median Flow tracker in the OpenCV. This rectangular cross-section is where the MAV must cross. By matching the location of the target cell's corner tags in the image with the actual points (knowing the target cell dimensions), the position (transfer vector) and orientation (rotation matrix) of the camera relative to the rectangular cross-section is provided. Hence, the resulting 6 Degree of Freedom (DOF) navigation data enables us to guide the MAV to cross the shelf.

2.2. Guidance and control algorithm

In the beginning, the MAV is guided to the optimal view

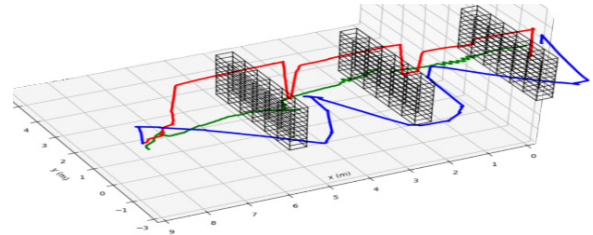


Fig. 4. A comparison between the path generated by the present guidance algorithm and the conventional guidance algorithms

Table 1. Evaluation of the MAV flight time and distance caused by the present method optimal path and conventional methods

Path generation strategy	Average elapsed time	Average traveled distance
Crossing shelves	240 sec	14 m
Crossing shelf tops	300 sec	22 m
Crossing shelf sides	360 sec	28 m

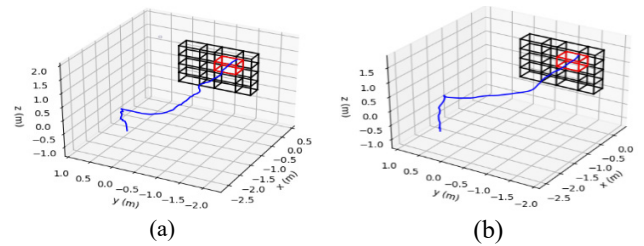


Fig. 5. The three-dimensional navigation data diagram in two different flights through the target cell (red) of the shelf (black)

point by the appearance of the first fragment of the tags grid (with a known number of tags, thus known dimensions). The shelf data are recorded, and the MAV is guided to cross the target cell using the navigation data. The path must be perpendicular to the cross-section. In this way, in the last phase (close distances, where the corner tags are out of the camera field of view), the MAV is aligned with the cross-sectional center of the cell. So it moves forward at a constant speed with no other movement, and the flight is secured in terms of collision with cell margins.

The vertical position and heading angle are controlled so that the image centroid (A in Fig. 2) coincides with the center of the target box (B in Fig. 2). The lateral position must be controlled to provide a collision-free crossing with a trajectory perpendicular to the shelf. The lateral speed command is generated according to the heading angle stated in visual navigation data, with a bang-off-bang control strategy as seen in Fig. 3. Three separate Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers are used for lateral and vertical speed and heading angle control. The longitudinal direction speed is constant.

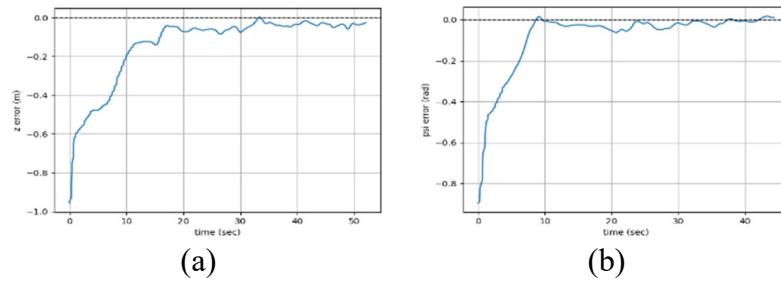


Fig. 6. The time response of the MAV (a) vertical position (b) heading angle

3. RESULTS AND DISCUSSION

Tests have been performed in both simulation and reality to evaluate the system performance.

3.1. Simulation

The system is simulated in the Gazebo - a 3D graphic simulator – with a ready-made simulated version of the Parrot AR Drone 2.0. The system’s performance in the simulation is analyzed in a warehouse such as Fig. 4 and compared with two common routes: passing through the top of the shelves (red) and passing through the shelves’ sides (blue). The simulation results are presented in Table 1.

3.2. Implementation

The system’s ability to pass the MAV through a sample shelf was evaluated in practice. A symbolic shelf with known dimensions and mission requirements as described in section 2 is prepared. The test MAV is a DJI Tello. The flight test is initialized at 2.5 to 3.5 meters from the shelf on the ground. Designed software runs on the computer and guides the MAV via a Wi-Fi connection. Success in this experiment means recording the correct information and crossing the shelf without collision. The test is done several times, and the reliability has been acceptable. Numerical data of the MAV trajectory during two successful flights are provided in Fig. 5. The listing of the hypothetical packages on the shelf has been quite successful.

The system’s time response to vertical position and heading angle control in a successful flight is presented in Fig. 6. It can be seen that the system error tends to zero, and the system is stabilized.

4. CONCLUSION

This paper presented a vision-based warehouse

inventory MAV system equipped with automatic navigation and guidance. The test results illustrate the practical success of the system. The MAV passes the shortest route through the shelf with no detour, indicating the path optimality. Regarding the cost, the MAV with which the test was implemented is priced at \$100. Additionally, the whole algorithm works with the input received by a single camera. Therefore, it can be said that the designed system can meet the stated three initial goals regarding the quality of mission execution.

REFERENCES

- [1] N. Macoir, J. Bauwens, Uwb localization with battery-powered wireless backbone for drone-based inventory management, *Sensors*, 19(3) (2019) 467.
- [2] M. Maurer, J. Pestana, Towards an autonomous vision-based inventory drone, in: *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2018.
- [3] F. Guérin, F. Guinand, Towards an autonomous warehouse inventory scheme, in: *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, IEEE, 2016, pp. 1-8.
- [4] A. De Falco, F. Narducci, An UAV autonomous warehouse , inventorying by deep learning, in: *International Conference on Image Analysis and Processing*, Springer, 2019, pp. 443-453.
- [5] D. Cristiani, F. Bottonelli, Inventory Management through Mini-Drones: Architecture and P-o-C Implementation, in: *2020 IEEE 21st International Symposium on "A World of Wireless Networks"*, IEEE, 2020, pp. 317-322.
- [6] I. Kalinov, A. Petrovsky, Cnn barcode detection-based uav trajectory optimization for autonomous warehouse stocktaking, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4) (2020) 6647-6653.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Fahimi, A. Naghash, *A Fast Warehouse Inventory Micro Aerial Vehicle System Equipped with Visual Guidance and Navigation Algorithm*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(12) (2022) 1447-1450.

DOI: [10.22060/mej.2021.19428.7022](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19428.7022)





سامانه آمارگیری سریع انبار توسط ریزپرنده مجهز به الگوریتم هدایت و ناوبری تصویری

حمیدرضا فهیمی، ابوالقاسم نقاش*

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۲۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۲۴

کلمات کلیدی:

بینایی ماشین

ریزپرنده

هدایت تصویری

ربات انبارگرد

بهینه‌سازی مسیر

خلاصه: مقاله حاضر، تلاشی است در راستای ادغام فنون بینایی رایانه و هدایت و کنترل پرنده‌های بدون سرنشین جهت طراحی و بهینه‌سازی یک مأموریت خودکار انجام‌شده توسط یک ریزپرنده، به نحوی که انجام خودکار مأموریت نسبت به انجام آن توسط انسان، به نحو قابل قبولی به‌صرفه‌تر باشد. سامانه‌ای جهت مدیریت فضای انبار به وسیله ریزپرنده مجهز به یک دوربین جلو ارائه گردیده‌است. الگوریتم‌های بینایی رایانه برای ریزپرنده امکان یافت موقعیت بسته‌ها، تأیید وجود یا عدم وجود یک بسته در انبار و آمارگیری کل انبار در زمان کوتاه را فراهم می‌سازد. روشی نوآورانه برای درک قفسه‌های انبار و بسته‌های موجود در آن توسط تصویر دوربین ارائه گردیده‌است که سامانه را قادر می‌سازد که به صورت آنی، ضمن انجام عمل آمارگیری از قفسه‌ها، مسیر حرکت بهینه را برای ریزپرنده تشخیص داده و سپس با پیروی از آن، مأموریت را در زمانی سریع‌تر نسبت به روش‌های هدایتی متداول کامل سازد. الگوریتم هدایتی طوری طراحی شده‌است که بازدهی عملیات خودکار نسبت به انجام عملیات توسط انسان به طور قابل توجهی افزایش یابد. سامانه مورد پیاده‌سازی قرار گرفته و داده خروجی آزمایش ارائه شده‌است. آزمایش‌ها حکایت از موفقیت سامانه در تأمین امنیت عملیات خودکار، ضمن کاهش زمان مأموریت دارد.

۱- مقدمه

انبار توسط یک ریزپرنده با ابعاد کوچک است.

شناسایی اشیاء در تصویر، یکی از مهمترین الزامات سامانه‌های بینایی پایه مجهز به ریزپرنده است. استفاده از رنگ برای تمیزدادن یک شیء از اطراف از لحاظ هزینه محاسبات نسبت به دیگر روش‌ها برتری دارد. در عین حال، در شرایط استفاده بدون تنظیم محیط خارجی، تغییر روشنایی و نحوه ترکیب اشیاء می‌تواند سبب ناکارآمدی روش شود. این روش در فضای بیرونی عموماً مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. اما نمونه‌های کاربرد آن برای فضاهای داخلی موجود است. چاپمن و ماتیس [۱] به استفاده از این روش برای سامانه تعقیب یک حساب رنگی توسط ریزپرنده استفاده کردند. نتو و همکاران [۲] مجموعه‌ای از چند روش برای شناسایی یک درگاه سبزرنگ را پیاده‌سازی و مقایسه نموده و در خلال کار از تحلیل فضای رنگ بهره می‌برند. در زمینه شناسایی شیء، استفاده از ساختار هندسی در شرایطی که با شیء

ناوبری و هدایت ریزپرنده‌ها در شرایط واقعی و عملیاتی مختلف، یکی از چالش‌های به روز دنیای رباتیک است. طیف گسترده‌ای از حسگرها و روش‌ها برای هوشمندسازی یک ربات پرنده و ایجاد قابلیت کنترل، موقعیت و مسیر به کار گرفته می‌شوند. دوربین‌ها، به عنوان دسته‌ای از حسگرهای سامانه ریزپرنده، به دلیل وزن و ابعاد کم، در عین مجموعه داده غنی که از محیط در اختیار قرار می‌دهند، از محبوبیت زیادی برخوردارند. نوشتار حاضر گزارشی از طراحی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی یک سامانه ریزپرنده هوشمند است. هدف، توانمندسازی یک ریزپرنده به صورت هوشمند، در انجام مأموریت‌های خدماتی به جای انسان است؛ به نحوی که نتیجه به صورت محسوسی به‌صرفه باشد. هدف، طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه مدیریت فضای

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: naghsh@aut.ac.ir



با تشابه بیشتر بتوان به پاپ و همکاران [۱۴] اشاره نمود که روشی برای هدایت تصویری یک ریزپرنده که بنا است از طریق پنجره وارد ساختمان شود ارائه کرده. همچنین آکولار و همکاران [۱۵] بر موضوع خودداری از برخورد با موانع، با تاکید بر سرعت بالای مأموریت تمرکز دارند؛ رویکردی که در راستای کاربردهای بهینه‌سازی مسیر راهگشا است. در مجموع، در خصوص موضوع هدایت ریزپرنده‌ها می‌توان گفت تفاوت در نوع مأموریت‌ها، ارزیابی کیفیت راهبردها را به شناخت ویژگی‌های مأموریت و نیازمندی‌های آن وابسته می‌سازد.

مقوله مدیریت انبار توسط ریزپرنده‌های انبارگرد یک موضوع کاملاً به‌روز در تحقیقات حوزه ریزپرنده‌ها است. دی فالکو و ناردوچی [۱۶] یک سامانه مدیریت موجودی انبار را با تمرکز بر افزایش دقت شناسایی بسته‌ها ارائه می‌نمایند. چنان که از شناسایی بسته‌ها با استفاده از روش‌های متداول خودداری نموده و یک شبکه عصبی با هدف شناسایی بسته‌های انبار با دقت بالاتر طراحی نموده است. در خصوص نیازمندی اصلی مسئله، مقایسه پژوهش دی فالکو و ناردوچی [۱۶] با گورین و گوناند [۱۷] خالی از لطف نیست. گورین و گوناند [۱۷] در عوض دقت عملیات، بر خودکارسازی عملیات تمرکز دارند. نتیجه آن است که سامانه مدیریت انبار مجهز به یک ربات زمینی به عنوان یک آشیانه متحرک برای ریزپرنده انبارگرد است. کنترل موقعیت ریزپرنده با استفاده از دوربین رو به پایین انجام شده و دوربین جلو داده قفسه‌ها را ثبت می‌کند. در برخی آثار، تمرکز پژوهشگر بر یک موضوع ویژه به حدی است که چالش‌های دیگر مسئله حل نشده و احتمالاً به کارهای آینده موقوف شده است. به طور مثال فرناندز و بلانکو [۱۸] تاکید زیادی بر ارائه یک سامانه ریزپرنده انبارگرد که حتی‌الامکان عمومی و مستقل از شرایط استفاده باشد دارند. به آن اندازه که ریزپرنده سامانه واجد حسگرهای لازم برای کار در فضای باز نیز هست. این در حالی است که ریزپرنده فاقد دوربین بوده و شناسایی بسته‌ها را با استفاده از شناساگرهای رادیویی^۳ انجام می‌دهد. فقدان حسگر تصویر موجب شده است که امکان هدایت خودکار ریزپرنده در فضای داخلی وجود نداشته باشد. ماکویر و باونس [۱۹] با توجه به انبارهای پهناور، با یک ریزپرنده مجهز به دوربین، نشانگرهای کیوآرکد^۴ که مختصات آن‌ها در نقشه از پیش دانسته انبار معلوم است را شناسایی می‌کنند. ناوبری و تخمین موقعیت ریزپرنده

دارای شکل هندسی منظم سروکار داریم راهگشا است. وو و همکاران [۳] به توسعه روش ریاضی مستقلی با استفاده از رابطه بین گوشه‌ها برای شناسایی مستطیل‌ها در تصویر پرداخته و موفق به تعمیم روش ارائه شده برای بقیه اشکال هندسی منتظم شدند. یانگ و کیم [۴] با بهره از مفهوم «نقطه ناپدید» موفق به استخراج برخی عناصر از تصاویر فضای داخلی ساختمان شدند. ژانگ و همکاران [۵] روشی نوآورانه برای شناسایی نمای ساختمان در تصاویر مناطق شهری با بهره از ترازوی و نظم لبه‌ها در تصویر شده ارائه نمودند.

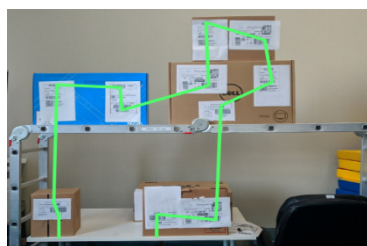
در زمینه هدایت و ناوبری، به فراخور تعریف هر مأموریت، الگوریتم‌های هدایتی می‌توانند با نگاه بهینه‌سازی یک یا چند مؤلفه مانند زمان مأموریت، انرژی مصرفی یا ... طراحی شوند. گروه قابل توجهی از آثار علمی (مانند پژوهش بی و همکاران [۶])، به حل مسائلی تحت موضوع کلی «جستجو و نجات» می‌پردازند. بلاش و همکاران [۷] سامانه‌ای مجهز به موقعیت‌یابی و نقشه‌برداری آنی^۱ برای مأموریت پرواز در فضاهای ناشناخته ارائه می‌نمایند. اشمید و همکاران [۸] یک سامانه ناوبری در محیط ناشناخته به همراه نقشه برداری سه‌بعدی با محاسبات نصب شده ارائه می‌کنند. گروهی از آثار بر مأموریت‌های خدمات شهری تمرکز دارند. مارزات و همکاران [۹] سامانه‌ای برای خدمت‌رسانی و بازرسی گیاهان، با ناوبری تصویری، بازسازی سه‌بعدی محیط و هدایت مبتنی بر ناوبری ایستگاهی^۲ ارائه می‌کند. مراجع [۱۰ و ۱۱] بر موضوع طی کردن طول راهرو توسط ریزپرنده بدون برخورد با دیوارها تمرکز دارند. همچنین، دسته‌ای از آثار به مقوله بهینه‌سازی مسیر تخصیص یافته‌اند. اشمیت و همکاران [۱۲] به توسعه ریاضیاتی بهینه‌سازی مسیر در مسئله اسکن کردن محدوده‌ای از زمین توسط چند ریزپرنده پرداخته‌اند. در یک شکل متداول از مسائل بهینه‌سازی مسیر، به کوتاه‌سازی مسیر در شرایط طراحی مسیر بر روی نقشه هوایی یک محدوده پرداخته می‌شود. متیو و همکاران [۱۳] در مسئله رساندن مرسوله توسط یک ربات زمینی و یک ریزپرنده، درصد برآمده‌اند که مسیر را با نگاه به زمان مأموریت و یا سوخت مصرفی بهینه نمایند. بهینه‌سازی مسیر در مسئله حاضر، از این جهت که کلیه فرایندها باید با اتکا بر داده حاصل از یک دوربین و برای یک مأموریت یک ریزپرنده به طور مستقل انجام گیرد، با این قبیل آثار متفاوت است. شاید در زمره کارهایی

3 Radio Frequency Identification (RFID)

4 QRcode

1 Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

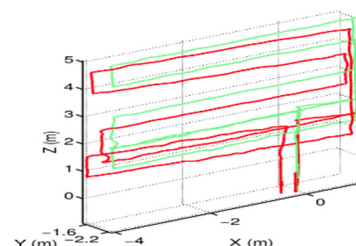
2 Waypoint navigation



(ج) مرجع [۲۱]



(ب) مرجع [۲۳]



(آ) مرجع [۲۲]

شکل ۱. نمونه مسیر پیموده شده توسط ریزپرنده انبارگرد در سه مورد از مراجع

Fig. 1. Three warehouse MAV trajectory samples in related works (a) Ref. [22] (b) Ref. [23] (c) Ref. [21]

هوشمندانه‌تری شامل روش‌هایی برای بهینه‌سازی مسیر شده است. در پژوهش کالینوف و پتروفسکی [۲۱] اگرچه مکانیابی همچون پژوهش کریستیانی و بتونلی [۲۳] با علائم زمینی صورت می‌گیرد. اما در این سامانه به کمک تخمین موقعیت از روی نشانگرهای شناسایی شده با شبکه عصبی، مسیرهای زائد پیموده شده از مسیر ریزپرنده حذف می‌شوند و نتیجه مسیری به صورت شکل ۱-ج است.

سامانه حاضر در آن دسته از سامانه‌ها که به دنبال توانمندساختن ریزپرنده انبارگرد به طور ویژه برای مانور در برابر قفسه‌های انبار هستند قرار می‌گیرد. به باور نگارنده، مولفه‌های متمایزکننده سامانه حاضر موارد زیر می‌باشند:

۱. بسیاری از سامانه‌ها مجهز به ابزارهای ارتباطی هزینه‌بر یا ریزپرنده‌های پیچیده هستند. در سامانه حاضر، مؤکدا تلاش بر آن است که کل عملیات به صورت کاملاً مبتنی بر یک ریزپرنده ارزان و با کمترین ابزارها و پیش زمینه‌های ممکن انجام گیرد.

۲. برخلاف سامانه‌های دارای ریزپرنده‌های مجهز به چند دوربین و یا حسگرهای دیگر، در سامانه حاضر، همه عملیات، هدایت و ناوبری و مدیریت موجودی انبار تنها با یک دوربین انجام گیرد. اتکای روش بر یک دوربین، علاوه بر مزایای اقتصادی، عدم وابستگی روش به شرایط و ابزارها و در نتیجه قابلیت انتقال و تعمیم الگوریتم به سادگی را به همراه دارد.

۳. مهم‌ترین ویژگی کار حاضر، طراحی مسیر بهینه برای ریزپرنده است. سامانه مجهز به توانایی شناسایی فضاهای خالی قفسه و عبور از داخل آنها است. رویکرد هدایت و کنترل ریزپرنده انبارگرد به این شرح در مقالات مرور شده یافت نشده است.

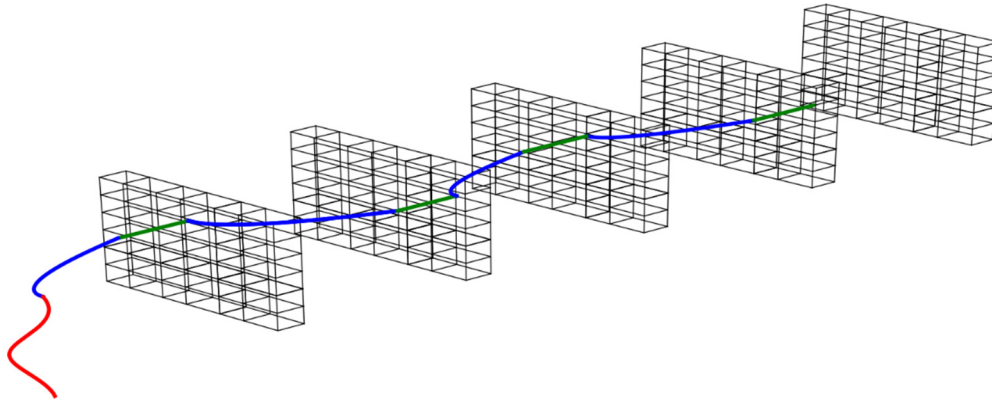
در ادامه، در بخش ۲ الگوریتم‌های بینایی رایانه بررسی شده‌اند. این بخش به کلیه پردازش‌های انجام شده بر روی خروجی دوربین

نیز در نقشه انبار با استفاده از ارتباط فراپهن باند^۱ انجام می‌شود.

در سامانه‌های مجهز به حسگر تصویر با ضرورت مانور ریزپرنده در برابر قفسه‌های انبار، معمولاً شناسایی بسته‌ها با الگوریتم‌های بینایی رایانه آماده که به شناسایی نشانگرهای خاص می‌پردازند انجام می‌شود. مثلاً در پژوهش ساها و همکاران [۲۰] شناسایی بسته‌ها به وسیله شناسایی نشانگرهای کیوآرکد موجود روی بسته‌ها و شناسایی قفسه‌ها نیز با شناسایی رمزهای حرفی - عددی صورت می‌پذیرد. در این روش‌ها، محدودیت‌هایی چون عملکرد ضعیف در شرایط نوری بد، برخی را بر آن داشته است که از حسگرهای غیر تصویری برای شناسایی نشانگرها استفاده کنند. در پژوهش کالینوف و پتروفسکی [۲۱] شناسایی بارکد^۲ با دوربین انجام می‌گیرد؛ اما یک دریافتگر لیزری اطلاعات نشانگر را می‌خواند. استفاده از این نشانگرها نقص عدم شناسایی در فاصله زیاد را نیز به همراه دارد؛ که خود موجب اهمیت یافتن ملاحظات ناوبری و هدایت خودکار می‌شود. در مورد راهبرد هدایتی، در مواردی که ریزپرنده بنا است در برابر قفسه انبار مانور دهد، عموماً مسیرهای زیگزاگی مشابه شکل ۱-ب) پی گرفته می‌شود که با توجه به محدودیت یادشده در خصوص فاصله ریزپرنده از نشانگرهای کیوآرکد و بارکد طبیعی است. مارر و پستانا [۲۲] با ترکیب ویژگی‌های استخراج شده از تصویر دوربین با خروجی حسگرهای حرکت‌سنجی معمول، به ناوبری قابل اعتمادتری برای ریزپرنده دست می‌یابند. با این حال در مواردی ناوبری کاملاً مبتنی بر تصویر دوربین است. در پژوهش کریستیانی و بتونلی [۲۳]، با کمک خطوط موجود بر روی زمین در راهروی مقابل قفسه، فاصله و زاویه ریزپرنده با قفسه کنترل می‌شود. ملاحظات هدایتی در موارد

1 Ultra-Wide Band (UWB)

2 Barcode



شکل ۲. نقشه نمادین فضای انبار با ۵ قفسه متوالی

Fig. 2. Schematic map of a warehouse with 5 consecutive shelves

سامانه می‌پردازیم.

۲-۱- مأموریت

سناریو کلی به این صورت است که ریزپرنده از موقعیت آشیانه از زمین برخاسته و در مقابل اولین قفسه، به صورتی که بهترین دید (موقعیت دارای کمترین فاصله از قفسه، که در آن برای دیدن محتویات قفسه نیاز به تغییر مکان ریزپرنده نباشد) را داشته باشد قرار می‌گیرد. در ادامه، ریزپرنده از کوتاه‌ترین مسیر از داخل سلول‌های خالی قفسه عبور کرده و در موقعیت دید بهینه در مقابل قفسه بعدی قرار خواهد گرفت. این فرایند تا زمانی که خروجی مطلوب مأموریت حاصل شود ادامه خواهد یافت. شکل ۲ به صورت نمادین مسیر حرکت پرنده در انبار را به نمایش می‌گذارد.

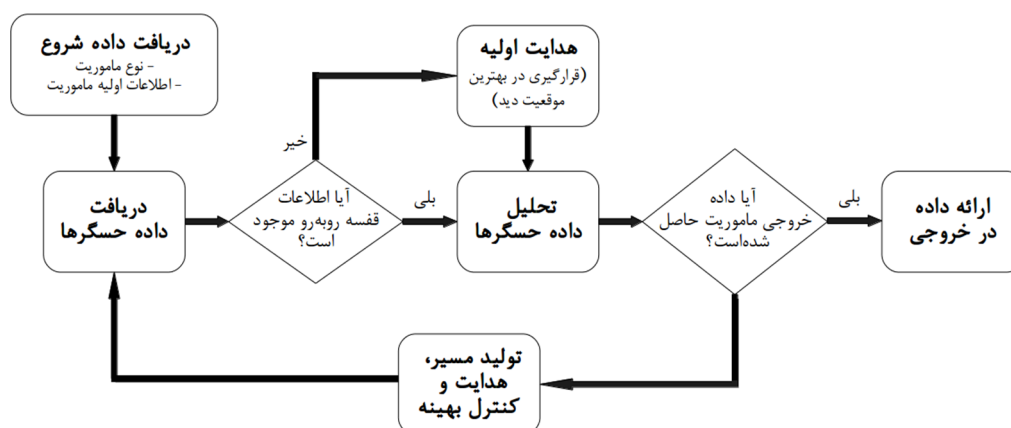
در نتیجه کار انجام‌شده، سامانه‌ای در اختیار انبار قرار می‌گیرد که قادر است عمل آمارگیری و یافتن بسته‌های انبار را انجام دهد. خروجی عملیات، فهرست بسته‌های مورد نظر طبق شناسه هر کدام به همراه موقعیت قرارگیری هر بسته در قفسه‌های انبار است. تلاش شده‌است که پیش‌نیازهای عملیات به حداقل رسد. در حال حاضر برای اجرای عملیات، لازم است بر روی محل انقطاع میله‌های عمودی و افقی قفسه‌ها، برچسب‌های رنگی قرار گیرد. همچنین جهت کاهش زمان انجام عملیات، لازم است فاصله قفسه‌ها در شکل ۲ به مقدار کمینه‌ای باشد که ریزپرنده می‌تواند بدون برخورد با قفسه قبلی، در موقعیت دید بهینه نسبت به قفسه بعدی قرار گیرد. در صورت عدم تأمین این پیش‌نیاز، هدایت ریزپرنده شامل حرکات اضافی است که

جلوی پرنده اختصاص دارد. سپس در بخش ۳، الگوریتم‌های مربوط هدایت ریزپرنده شرح داده شده‌اند. این بخش، پردازش‌های انجام شده از ترکیب حسگرها تا هدایت و کنترل ریزپرنده را شامل می‌شود. پس از تشریح روش‌ها، نتایج به دست آمده از آزمایش، در بخش ۴ ارائه شده‌اند. در پایان، در بخش ۵، داده‌های خروجی آزمایش مورد بررسی قرار گرفته‌اند در رابطه با موفقیت کلی مأموریت ریزپرنده انبارگرد نتیجه‌گیری به عمل آمده است. بخش پایانی به امکانات بالقوه و همچنین پیشنهادهایی برای توسعه کار اختصاص یافته است.

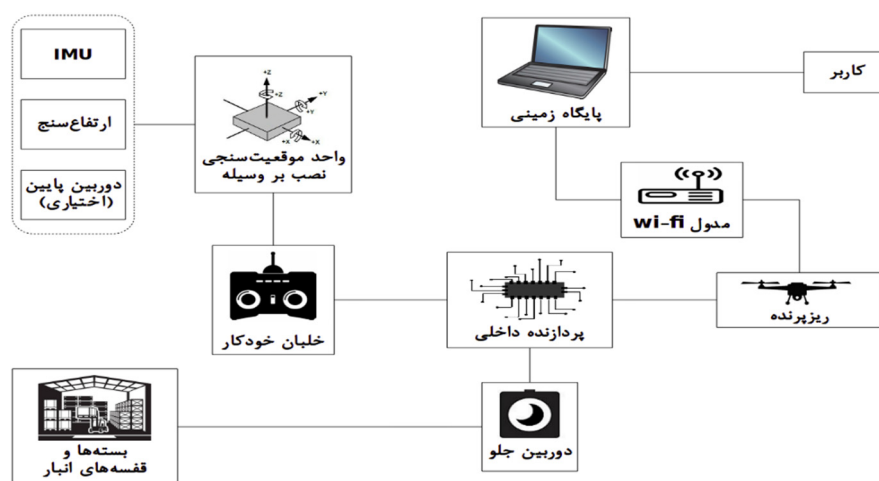
۲- سامانه ریزپرنده انبارگرد

انبار مسئله یک فضای درون ساختمان شامل تعدادی قفسه است که به صورت موازی پشت هم ردیف شده‌اند. سلول‌های قفسه‌ها از هر دو طرف باز می‌باشد. بسته‌های موجود، جعبه‌هایی هستند که روی هر کدام شناسه مخصوصی قرار گرفته است و عددی به آن بسته اختصاص می‌دهد. در شرایط آزمایش، تعدادی بسته به صورت اتفاقی در سلول‌های مختلف قفسه‌ها قرار گرفته و بقیه سلول‌ها خالی هستند. منظور از عمل آمارگیری از انبار، فهرست نمودن همه بسته‌های موجود به همراه موقعیت آنها می‌باشد. سامانه ریزپرنده انبارگرد با هدف انجام این مأموریت با بازدهی قابل توجه نسبت به انجام انسانی آن طراحی و پیاده‌سازی شده است. نرم افزار طراحی شده، به صورت مستقل از ریزپرنده، بر روی رایانه اجرا شده و ریزپرنده را از طریق اتصال وای-فای^۱ هدایت می‌نماید. در بخش حاضر به معرفی کلی

1 Wi-Fi



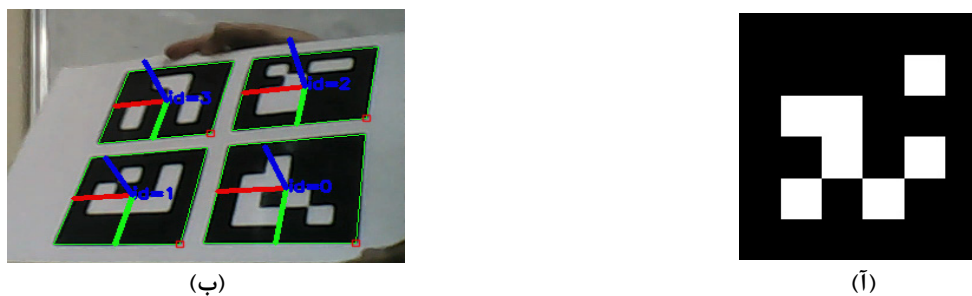
شکل ۳. نمودار کلی اجزاء سامانه ریزپرنده انبارگرد
 Fig. 3. An overall diagram of the warehouse MAV system components



شکل ۴. نمودار برهمکنش اجزاء سخت افزاری سامانه ریزپرنده انبارگرد
 Fig. 4. An interaction diagram of the warehouse MAV system hardware components

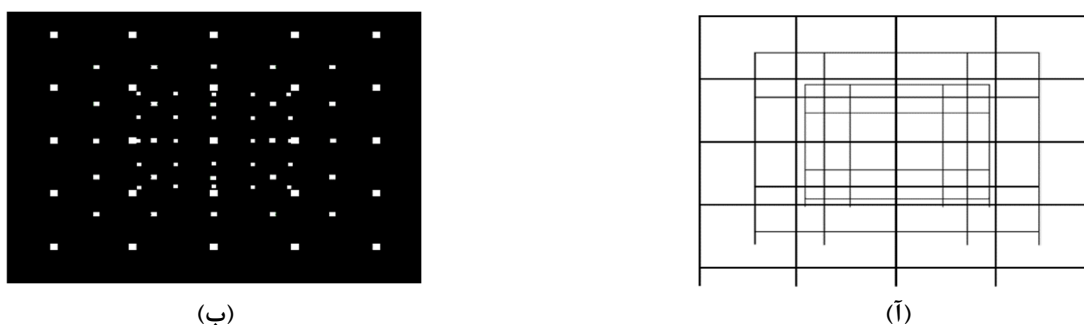
در آزمایش حاضر از آن صرف نظر شده است. منحصر به داده‌ها یا فرمان لازم برای آغاز مأموریت می‌باشد. در مورد جعبه دریافت داده حسگرها، تنها حسگر مورد استفاده در سامانه، دوربین جلو است. هدایت اولیه به قرارگیری در موقعیت دید بهینه اشاره دارد. پس از دریافت داده‌های قفسه، این جعبه از حلقه خارج می‌شود. عملیات تحلیل داده حسگرها شامل طبقه‌بندی قفسه‌ها، شناسایی بسته‌ها، تعیین موقعیت هر بسته و تعیین بهترین گزینه برای عبور از قفسه در میان سلول‌های خالی است. در تولید مسیر، هدایت و کنترل، فرمان‌های لازم برای حرکت ریزپرنده تولید می‌شود. نمودار شکل ۴ نحوه برهمکنش اجزاء سخت‌افزاری سامانه را تشریح می‌نماید. شکل ۴ یک طرحواره کلی از نظام سخت‌افزاری سامانه حاضر را شامل می‌شود که ریزپرنده‌ها با مجموعه حسگرهای گوناگون می‌توانند در آن قرار گیرند.

۲-۲- الگوریتم
 اعمال سامانه در طول مأموریت، به دو دسته اصلی دریافت داده‌ها از محیط و تحلیل داده‌ها و نتیجه‌گیری قابل تقسیم است. داده‌ها در واقع همان تصویر دوربین است. در شرایطی که خروجی اصلی حاصل نشده است، داده حسگرها جهت کنترل ریزپرنده مورد تحلیل قرار می‌گیرد. مجموعه این اعمال، در قالب وظایف مربوط به بخش‌های مجزای سامانه مطابق شکل ۳ سازمان‌دهی شده است.
 در شکل ۳، دو جعبه دریافت داده شروع و ارائه داده در خروجی در رابط کاربری قرار می‌گیرند. کارهایی که کاربر با آن‌ها درگیر است،



شکل ۵. (آ) نمونه نشانگر به کار رفته برای شناسایی بسته‌های انبار (ب) نحوه شناسایی و درک سه‌بعدی نشانگرها

Fig. 5. (a) A package identification marker (b) Identification and three-dimensional perception of the markers



شکل ۶. (آ) نمای سه قفسه متوالی از روبه‌رو (ب) تصویر تصفیه‌شده رنگ سه قفسه متوالی با برچسب‌های رنگی در محل تقاطع سلول‌ها

Fig. 6. (a) A front view of three consecutive shelves (b) A color-filtered image of three consecutive shelves with colored tags at each cell intersection

۳-۲- درک تصویری قفسه

شکل ۶(آ) سه قفسه متوالی را از نمای روبه‌رو نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بخشی از سلول‌های قفسه نخست را نمی‌توان به راحتی از قفسه‌های بعدی تشخیص داد. این مشکل در شکل ۶(ب) حل شده است. شکل ۶(ب) تصویر حاصل از قراردادن برچسب‌های رنگی بر روی محل‌های انقطاع و تصفیه تصویر برای یافت رنگ را نمایش می‌دهد. روند شناسایی قفسه در سامانه به این ترتیب است. حصول تصویر یادشده یکی از روش‌های بینایی رایانه است که با بهره از ویژگی‌های فضای رنگ اچ اس وی^۱، به آسانی امکان جداکردن نواحی دارای رنگ خاص از پیش تعیین‌شده در تصویر را فراهم می‌کند.

برای تمایز دو قفسه پیشین و پشتی، در شرایطی که دوربین دارای زاویه نصب رو به پایین باشد، و یا وقتی که ریزپرنده با قفسه حول هر یک از سه راستای فضای سه بعدی دارای زاویه باشد، حذف کردن برچسب‌های دارای مساحت کوچکتر از مقداری ثابت در تصویر روش

۳-۱- الگوریتم‌های بینایی رایانه

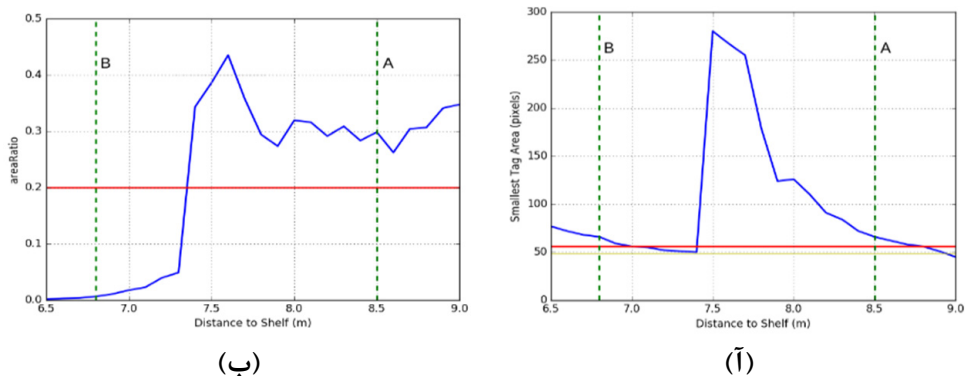
همان‌طور که گفته شد، سامانه به صورت کاملاً مبتنی بر داده به دست آمده از دوربین کار می‌کند. در هر یک از مراحل از ابتدای مأموریت، داده تصویری نقش کلیدی ایفا می‌نماید. در این قسمت به تفکیک به توضیح اجزاء الگوریتم بینایی رایانه پرداخته شده‌است.

۳-۱-۱- درک تصویری بسته‌ها

بسته‌های موجود در انبار به وسیله نشانگرهای مدول ای‌آریوکو^۱ متعلق به کتابخانه اوپن‌سی‌وی^۲ شناسایی می‌شوند و به هر کدام یک شناسه عددی منحصر به فرد اختصاص داده می‌شود. شناسایی نشانگرها، شامل یافت موقعیت پیکسلی هر کدام در تصویر به همراه تخصیص عدد مربوط به هر نشانگر به آن می‌شود. شکل ۵(آ)-نمونه‌ای از نشانگرهای یادشده و شکل ۵(ب) شناسایی نشانگرها در واقعیت را به نمایش می‌گذارد.

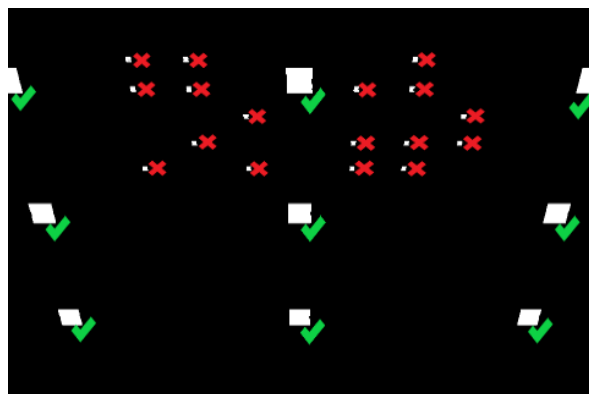
3 Hue – Saturation – Value (HSV)

1 ArUco
2 OpenCV



شکل ۷. نمودار (آ) مساحت کوچکترین برچسب موجود در تصویر (ب) مؤلفه رابطه (۱)، بر حسب فاصله دوربین از قفسه

Fig. 7. (a) The area of the smallest image tag in terms of distance between the camera and the shelf (b) Parameter of Eq. (1) in terms of distance between the camera and the shelf



شکل ۸ نحوه تمایز برچسب‌های قفسه جلو (علامت سبز) و پشت (علامت قرمز) در تصویر

Fig. 8. Differentiation of the front shelf tags (marked green) and back (marked red) in the picture

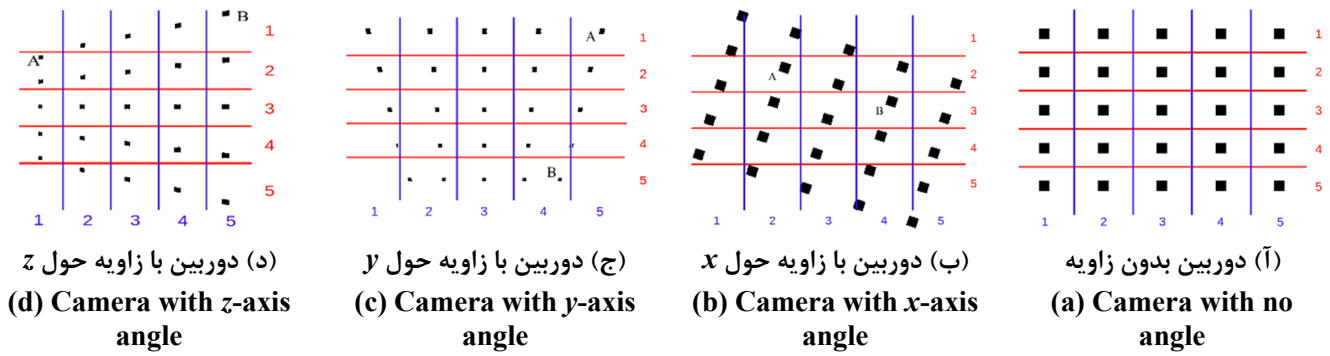
۳-۳- شناسایی ماتریس قفسه

وظیفه این بخش از الگوریتم، دسته‌بندی سلول‌های قفسه و تخصیص شماره سطر و ستون به هر سلول است. ساده‌ترین راه برای دسته‌بندی سطری و ستونی نقاط، دسته‌بندی طبق طول و عرض نقاط، مطابق شکل ۹-آ) است. در شکل ۹-ب) تا ۹-د)، از روش یادشده جهت دسته‌بندی برچسب‌ها، در شرایطی که دوربین حول سه محور x ، y و z نسبت به وجه روبه‌روی قفسه دارای زاویه است استفاده شده است. دیده می‌شود که به اشتباه تعدادی از نقطه‌ها که در آرایه حقیقی هم‌سطر یا هم‌ستون هستند (مانند نقاط A و B) در سطر یا ستون متفاوت جا گرفته‌اند. بنابراین این روش جهت دسته‌بندی نقاط در کاربرد فعلی ناکارآمد است. برای این که در شرایط دوران‌یافته بودن جدول، مشکلی همانند شکل ۹-ب) تا ۹-د) به وجود نیاید، از نوعی دسته‌بندی پله‌ای

مناسبی نیست. بهتر است برای این کار از مؤلفه رابطه (۱) استفاده شود.

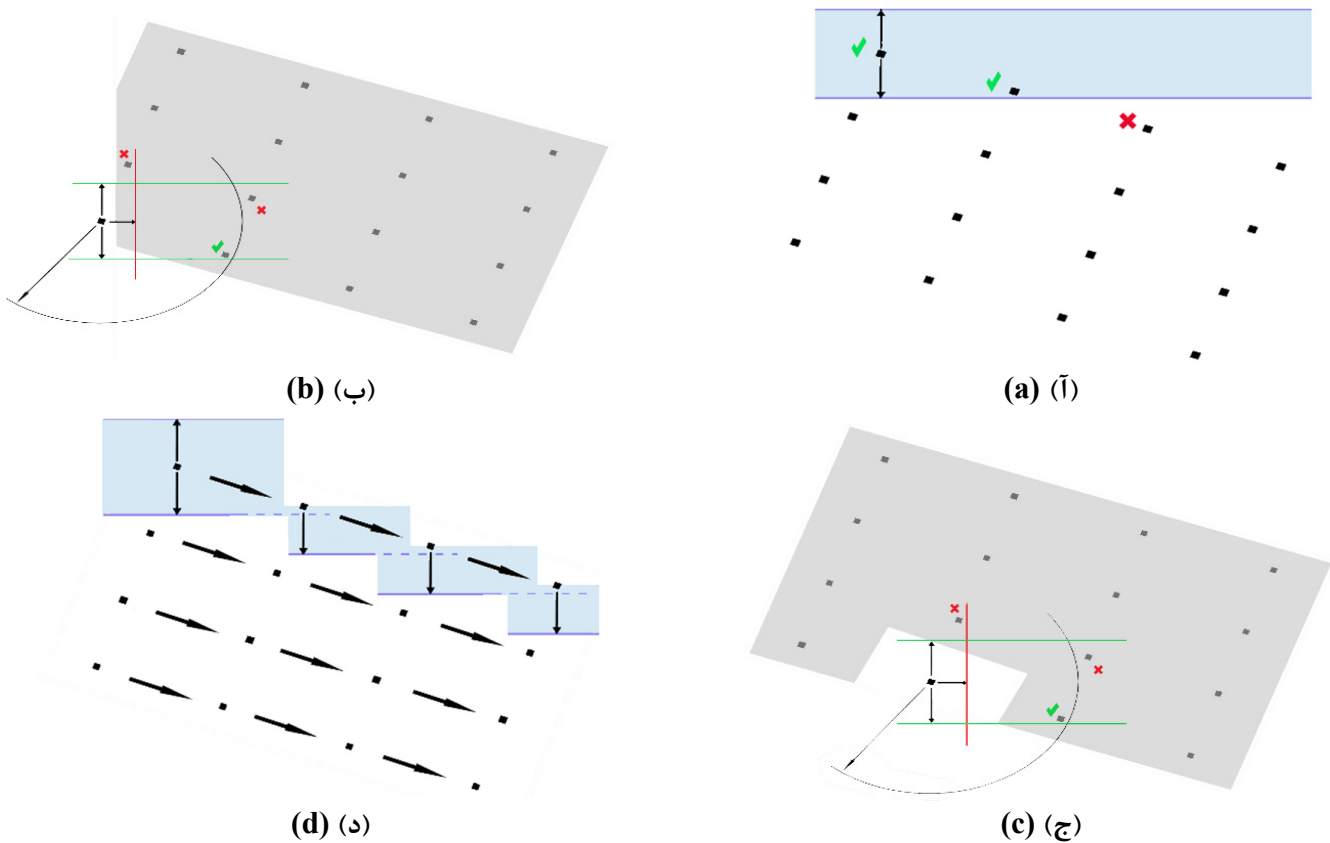
$$AR = \frac{ST}{LT} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، مؤلفه ST به مساحت کوچکترین و مؤلفه LT به مساحت بزرگترین برچسب در تصویر اشاره دارند. نمودار شکل ۷-آ)، نشان‌دهنده مساحت کوچکترین برچسب موجود در تصویر بر حسب فاصله و نمودار شکل ۷-ب)، نشان‌دهنده مؤلفه رابطه (۱) می‌باشد. در شکل ۷ خط قرمز رنگ معیاری است که مقادیر بیشتر یا کمتر از آن به قفسه متوالی پیشین و یا پشتی اطلاق می‌گردد. شکل ۸ شامل علامت‌هایی برای روشن‌شدن نحوه تشخیص برچسب‌های قفسه جلو از برچسب‌های قفسه پشت می‌باشد.



شکل ۹. تقسیم‌بندی سطری و ستونی نقاط با استفاده از آستانه‌گذاری ساده روی محور عمودی و افقی تصویر

Fig. 9. Row and column classification of points using simple thresholding on the vertical and horizontal axis of the image

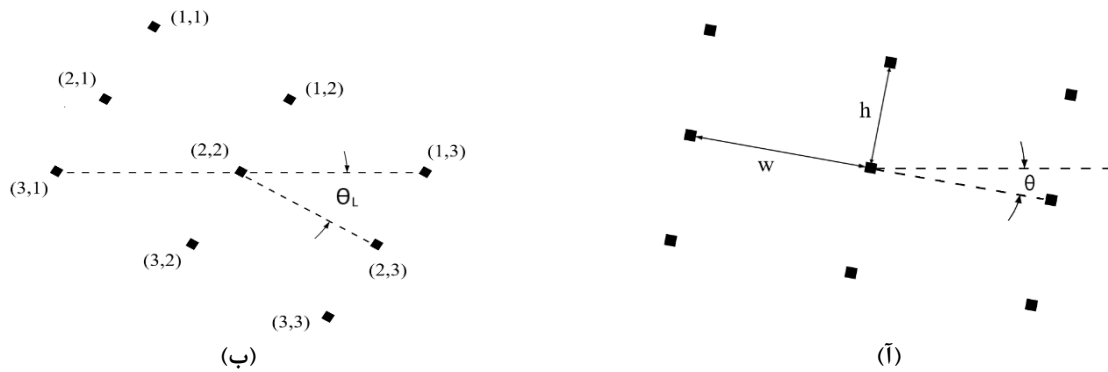


شکل ۱۰. مراحل دسته‌بندی پله‌ای سطری و ستونی نقاط ماتریس دارای چرخش

Fig. 10. The steps of the stair classification of a rotated point grid

که مطمئن شویم نقطه هم‌سطر دیگری موجود نیست ادامه می‌یابد. برای دسته‌بندی ستونی نیز به طریق مشابه عمل خواهیم کرد. به این ترتیب، رابطه (۲) شیوه بررسی نقطه نامزد Q را برای هم‌سطر یا هم‌ستون بودن با نقطه نامزد P نشان می‌دهند.

استفاده می‌کنیم. شکل ۱۰ نمایی از مراحل این روش را نشان می‌دهد. روش به این صورت است که با در نظر گرفتن آستانه‌ای ثابت برای هر نقطه، نقطه هم‌سطر آن را پیدا می‌کنیم. سپس به همین ترتیب برای نقطه بعدی نقطه هم‌سطر را جستجو می‌کنیم و این کار تا جایی



شکل ۱۱. یک جدول دوران یافته ۳×۳ از نقاط با دو زاویه دوران مختلف
Fig. 11. A 3 × 3 table of points rotated with two different angles

همچنین، مقدار زاویه حدی θ_L با استفاده از رابطه (۴) قابل تعیین است.

(۳)

$$\text{if } w > h: \quad \Delta x_{\text{lim}} = \frac{(\min\{w, h\})^2}{\sqrt{h^2 + w^2}}, \quad \Delta y_{\text{lim}} = \frac{hw}{\sqrt{h^2 + w^2}} \quad \bar{A}$$

$$\text{if } w < h: \quad \Delta x_{\text{lim}} = \frac{hw}{\sqrt{h^2 + w^2}}, \quad \Delta y_{\text{lim}} = \frac{(\min\{w, h\})^2}{\sqrt{h^2 + w^2}} \quad \bar{B}$$

$$\theta_L = \tan^{-1} \left(\frac{\min\{w, h\}}{\max\{w, h\}} \right) \quad (۴)$$

۳-۴- ردیابی اشیاء و درک سه بعدی

پس از شناسایی قفسه، بسته‌ها و سلول‌های خالی، نزدیک‌ترین سلول خالی به مرکز تصویر به عنوان هدف انتخاب می‌شود. در ادامه لازم است این هدف در قاب‌های متوالی تصویر دوربین ردیابی شود. برای این کار، از ردیاب جریان میانه^۱ موجود در کتابخانه اوپن‌سی‌وی استفاده شده است. روش کار به این صورت است که با تعیین سلول هدف، مستطیل محیط بر پرچسب‌های چهار گوشه سلول هدف انتخاب شده و به عنوان ورودی به ردیاب داده می‌شود. ردیاب این ناحیه را در تصویرهای بعدی شناسایی نموده و مستطیل را بروزرسانی می‌نماید. با داشتن تصویر سلول هدف، آن را به مثابه یک مقطع مستطیلی عبور برای ریزپرنده در نظر می‌گیریم.

عملیات ناوبری تصویری ریزپرنده انبارگرد با دانستن ابعاد سلول‌های قفسه و شناسایی پرچسب‌های محل انقطاع سطرها و ستون‌ها انجام می‌گیرد. مرکز ناحیه مربوط به هر پرچسب در تصویر

(۲)

$$\bar{A} \quad \text{if: } |y_P - y_Q| < \Delta y_{\text{lim}} \text{ and } \Delta x_{\text{lim}} < |x_P - x_Q| \\ \text{and } |x_P - x_Q| = \Delta x_{\text{min}} \Rightarrow P, Q \in R_k$$

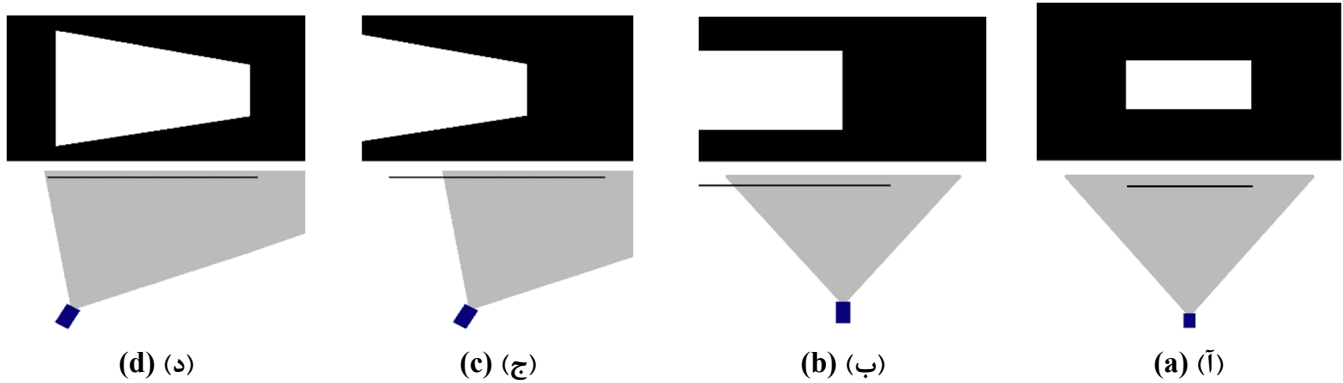
$$\bar{B} \quad \text{if: } |x_P - x_Q| < \Delta x_{\text{lim}} \text{ and } \Delta y_{\text{lim}} < |y_P - y_Q| \\ \text{and } |y_P - y_Q| = \Delta y_{\text{min}} \Rightarrow P, Q \in C_k$$

در رابطه (۲)، Δx_{lim} و Δy_{lim} نمایانگر بیشینه فاصله عمودی نقاط هم‌سطر و افقی نقاط هم‌ستون است و در شکل ۱۰ با خطوط قرمز و سبز مشخص شده است. R_k و C_k به ترتیب اشاره به سطر k ام و ستون k ام دارند. همچنین عبارت Δx_{min} و Δy_{min} نشان‌دهنده آن است که از بین نقاطی که شرایط در آن‌ها برقرار است، نقطه‌ای که فاصله کمتر را با نقطه P دارد برگزیده می‌شود.

در ادامه کران اندازه زاویه برای این که دسته‌بندی مطابق شکل ۱۰-۵) ممکن باشد را می‌یابیم. در شکل ۱۱-آ) یک ماتریس نقاط با زاویه θ نسبت به افق را می‌بینیم. نقاط دارای چینش منظم بوده و فاصله دو ستون (w) و یا دو سطر مجاور (h) و شماره سطر و ستون هر نقطه در شکل مشخص است. شکل ۱۱-ب) ، همان ماتریس شکل ۱۱-آ) را با زاویه دوران بیشتر θ_L به نمایش می‌گذارد. در شکل ۱۱-ب) دیده می‌شود که محور قطری ماتریس نقاط با راستای افقی تصویر هم‌راستا شده است. وضعیت نشان داده‌شده در شکل ۱۱-ب)، همان زاویه حدی که روش دسته‌بندی پله‌ای برای زوایای دوران بیش از آن کارآ نیست را نشان می‌دهد.

با تحلیل هندسی شکل ۱۱-ب)، می‌توان برای ساختارهای مستطیلی که در آن فاصله افقی نقاط بیشتر از فاصله عمودی آنها بوده به رابطه (۳-آ)) و برای ساختارهای مستطیلی که در آن فاصله عمودی نقاط بیشتر از فاصله افقی آنها است به رابطه (۳-ب)) رسید.

1 Median flow



شکل ۱۲. تأثیر تغییر وضعیت و موقعیت دوربین در تصویر صفحه مستطیلی مقابل آن
Fig. 12. The effect of camera position change on the image of the rectangular screen in front of it

۴- هدایت ریزپرنده

در این بخش جزئیات هدایت و کنترل حرکت ریزپرنده انبارگرد ارائه شده است. مطالب این بخش تحت عنوان سه کلیدواژه کلی ناوبری، هدایت و کنترل قابل طبقه بندی است. فرض شده است که ریزپرنده می‌خواهد در طولانی‌ترین شکل مأموریت، در مقابل همه قفسه‌های انبار قرار گیرد. ضمناً مجموعه داده پسخور در اینجا همان داده تصویری که در بخش قبل بیان شد است.

۴-۱- یافت موقعیت دید بهینه

همانطور که پیش از این آمد، به جهت بهینه‌سازی مسیر، ریزپرنده باید در موقعیتی در مقابل قفسه آمارگیری را انجام دهد که برای دریافت داده‌های کافی، نیاز به حرکت آن نباشد. این موقعیت نزدیکترین جایی است که ریزپرنده می‌تواند همه سلول‌های قفسه را ببیند. برای درک نحوه هدایت خودکار ریزپرنده به موقعیت و وضعیت یادشده، فرض کنید که دوربینی با میدان دید مشخص در برابر یک صفحه مستطیلی با ابعاد معلوم قرار می‌دهیم. شکل ۱۲ به صورت نمادین تأثیر تغییر وضعیت و موقعیت دوربین را در نمای صفحه مستطیلی در تصویر به نمایش می‌گذارد. تغییر موقعیت، می‌تواند نتیجه‌ای مشابه شکل ۱۲- (آ) و ۱۲- (ب) داشته باشد. تغییر وضعیت، موجب می‌شود که هندسه مستطیلی به صورت شکل ۱۲- (ج) پدیدار شود. شکل ۱۲- (د)، دربردارنده اثر همزمان تغییر موقعیت و وضعیت دوربین از موقعیت و وضعیت بهینه می‌باشد. در حالت کلی، تصویر مستطیل، نتیجه‌ای از ترکیب این چند حالت است.

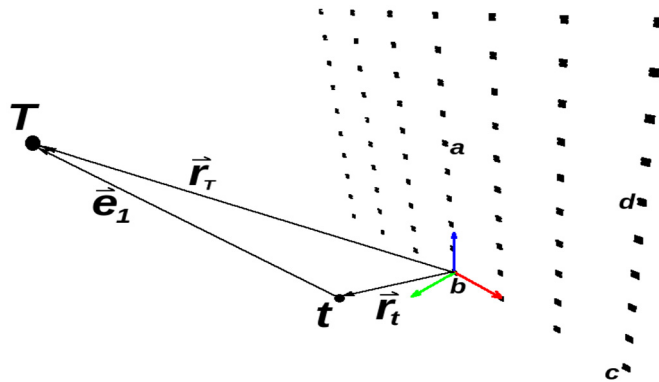
به عنوان نقطه گوشه سلول در نظر گرفته می‌شود. داده ناوبری با استفاده از رابطه (۵) قابل حصول است.

$$p = M_{in} \Pi M_{ex} P \quad (5)$$

برای استفاده از رابطه (۵)، با داشتن ابعاد سلول، مختصات چهار گوشه آن در دستگاه مختصات واقع بر گوشه سلول معلوم است (نقطه P). با دانستن مختصات نقاط متناظر در تصویر دوبعدی (نقطه p)، می‌توان انتقال میان دستگاه دوربین و دستگاه یادشده را به دست آورد. این انتقال، در واقع همان موقعیت (بردار انتقال) و وضعیت (ماتریس چرخش) دوربین نسبت به مستطیل هدف است که داده ناوبری شش درجه آزادی را تشکیل داده و در ماتریس M_{ex} جای می‌گیرد. رابطه (۶)، شکل باز شده رابطه (۵) را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}^p = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}^P \quad (6)$$

درک سه‌بعدی گفته‌شده را می‌توان به شیوه شکل ۵- (ب) پدیدارسازی نمود. در شکل ۵- (ب) مشاهده می‌شود که با معلوم بودن ابعاد، مختصات چهار گوشه هر مستطیل (مثلاً نشانگرهای شکل ۵- (آ)) در تصویر می‌تواند مبنای درک سه‌بعدی واقع شود. در حین پرواز، داده‌های عددی این روش، با استفاده از چهار گوشه سلول هدف به دست آمده و به عنوان پسخور کنترل به کار خواهند آمد.



شکل ۱۳. هندسه هدایت ریزپرنده به موقعیت دید بهینه

Fig. 13. The geometry of MAV guidance to the optimal viewing point

بین دستگاه‌های مختصات را انجام داد. می‌دانیم که الگوریتم بینایی رایانه بردار چرخش \bar{V} را در اختیار قرار می‌دهد که بیان چرخش در آن، با استفاده از بردار رودریگز^۱ می‌باشد. در این روش، چرخش دو دستگاه مختصات در فضا نسبت به یکدیگر به وسیله برداری بیان می‌شود که راستای آن، راستای بردار یکه‌ای که چرخش پیرامون آن انجام گرفته و اندازه آن، اندازه زاویه چرخش بر حسب رادیان است. ماتریس R را با کمک رابطه (۸) می‌توان به دست آورد.

$$R = (\cos \alpha)I + (1 - \cos \alpha)\bar{r}\bar{r}^T + \sin \alpha \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y \\ r_z & 0 & -r_x \\ -r_y & r_x & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، بردار یکه راستای چرخش و α زاویه چرخش بر حسب رادیان است. به این ترتیب و با استفاده از خروجی الگوریتم ناوبری تصویری و روابط (۷) و (۸)، در هر لحظه با کمک تصویر سلول هدف، موقعیت و وضعیت ریزپرنده در اختیار قرار می‌گیرد.

۳-۴- هدایت تصویری

شکل ۱۴ سه مرحله اصلی هدایت ریزپرنده را نشان می‌دهد. پس از مرحله بهینه‌سازی دید که شرح آن آمد، و کسب اطلاعات قفسه، ریزپرنده برای پیروی از مسیر بهینه، در طی دو مرحله بعدی از داخل نزدیکترین سلول خالی عبور می‌کند. پس از نزدیک شدن به قفسه

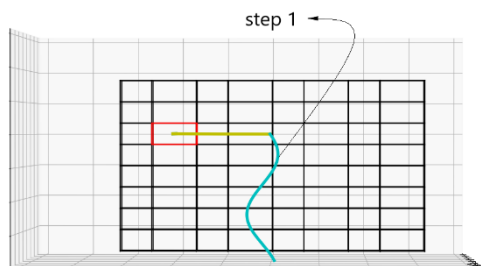
در واقعیت، ماهیت صفحه مستطیلی در شکل ۱۲، یک جدول نقاط (برچسب‌های نصب شده بر قفسه) است. شکل ۱۳ نمایانگر این وضعیت است. در شکل ۱۳، موقعیت t موقعیت فعلی ریزپرنده و موقعیت T موقعیت دید بهینه است. با پدیدار شدن قطعه‌ای از جدول نقاط در تصویر که مستطیل نمایانگر حدود آن است، با استفاده از ناوبری تصویری حاصل از مستطیل $abcd$ به شرحی که قبلاً آمد، می‌توان ریزپرنده را جهت حرکت در راستای بردار خطای e_1 هدایت نمود.

۲-۴- ناوبری حین پرواز

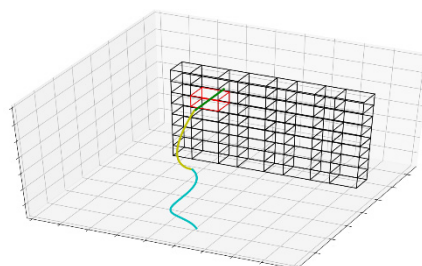
همانطور که گفته شد، ناوبری تصویری سامانه با تشخیص چهار رأس مستطیل سلول هدف با ابعاد از پیش مشخص به دست آمده و خروجی الگوریتم، دو بردار چرخش \bar{V} و انتقال \bar{T} است. با توجه به این که طراحی مسیر و هدایت در سامانه به کمک زاویه و مکان ریزپرنده نسبت به دستگاه ثابت دریچه ورود انجام می‌گیرد، لازم است که مختصات دوربین در دستگاه مستطیل به دست آید. برای به دست آوردن مختصات یادشده، می‌دانیم رابطه (۷) میان مختصات نقاط در دستگاه دوربین (p) و مختصات نقاط در دستگاه شیء (P) با بردار انتقال \bar{T} و ماتریس چرخش R دستگاه دوربین نسبت به شیء برقرار است.

$$P = \bar{T} + Rp \quad (9)$$

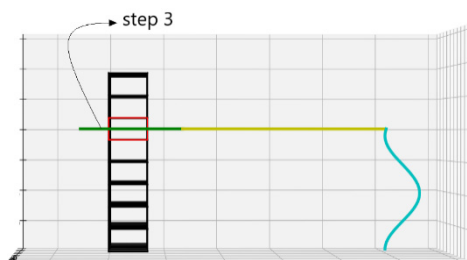
بنابراین با داشتن این دو مؤلفه، می‌توان به راحتی انتقال و چرخش



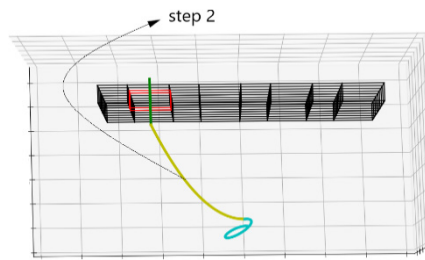
(ب) مرحله قرارگیری در موقعیت بهینه دید
(b) An overall diagram of the



(آ) مسیر کلی
(a) An overall diagram of



(د) مرحله عبور از قفسه
(d) An overall diagram of the



(ج) مرحله تقرب
(c) An overall diagram of

شکل ۱۴. نمای کلی و مراحل سه‌گانه حرکت ریزپرنده انبارگرد در برابر قفسه

Fig. 14. Overview and the three steps of the MAV path in front of the shelf

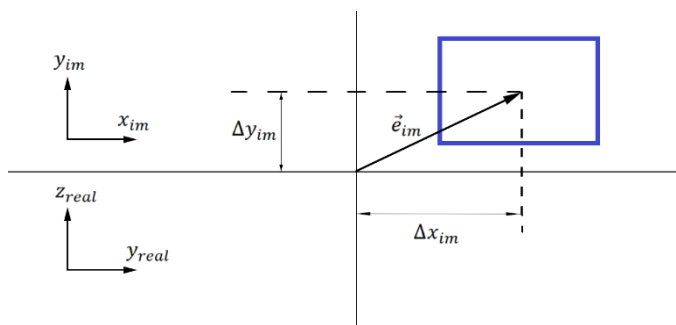
صورت کلی و در شرایطی که ایرادی در روند ردیابی و حرکت به سوی هدف وجود ندارد، مقدار سرعت رو به جلوی ثابتی به عنوان فرمان حرکت طولی به ریزپرنده داده می‌شود.

با توجه به این که در مرحله عبور از قفسه موضوع برخورد با قفسه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لازم است که مسیر وسیله طوری اصلاح شود که هنگام ورود به سلول، حتی الامکان منطبق بر خط عمود بر وجه قفسه در محل مرکز سلول هدف باشد. بنابراین، ریزپرنده باید یک حرکت انتقالی را برای عمودی‌سازی مورد نظر بپیماید. به همین دلیل، مؤلفه λ مؤلفه کنترلی در عملیات عمودی‌سازی است. این کار با پس‌خور ψ ناوبری تصویری، تحت قانون کنترلی که در بخش ۴-۳-۴ تشریح خواهد شد صورت می‌پذیرد.

شکل ۱۶ در فهم کامل فایده راهبرد هدایتی موجود راهگشا است. در شکل ۱۶، مسیر SBT مسیر متعارفی که یک ریزپرنده انبارگرد عادی می‌پیماید، و مسیر SAT نتیجه طراحی مسیر بهینه سامانه حاضر است. می‌توان نشان داد که چنین مسیری دست کم نصف طول مسیر متعارف را دارا است. به این ترتیب دست کم ۵۰ درصد در طول مسیر پیموده‌شده صرفه جویی می‌شود.

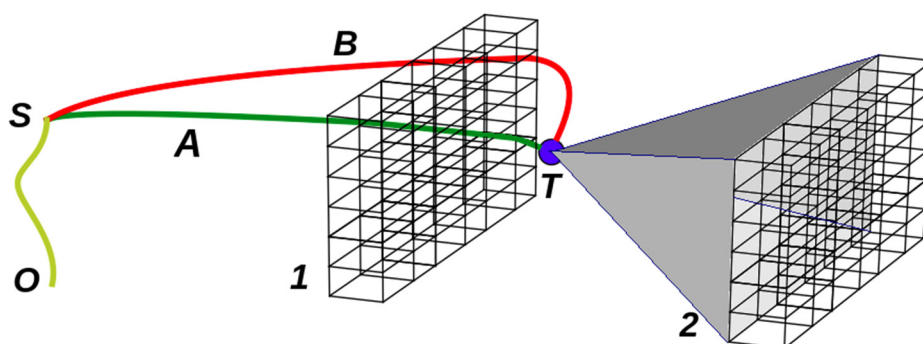
طی راهبرد هدایتی مخصوص مرحله تقرب به قفسه، در مرحله عبور از قفسه با توجه به تراز بودن ریزپرنده با مرکز مقطع سلول، وسیله با یک سرعت ثابت رو به جلو و ثابت نگاه‌داشتن وضعیت، روی خط راست هدایت می‌شود تا از قفسه عبور نماید.

در مرحله تقرب، هدف آن است که ریزپرنده یک مسیر کوتاه و عمودی را به سوی مقطع عبور بپیماید. نقطه تنظیم در کنترل دو مؤلفه z و ψ ، نقطه مرکزی تصویر است. نقطه یادشده در حالتی که محور دوربین، فاقد زاویه نصب با محور بدنی ریزپرنده باشد در مرکز قاب تصویر قرار می‌گیرد. این نقطه در شکل ۱۵ همان نقطه تقاطع خط عمودی و افقی می‌باشد. همچنین مرکز جعبه دربرگیرنده تصویر سلول هدف، پس‌خور کنترل موقعیت است. تفاضل این دو مقدار در راستای x و λ مختصات تصویر که به عنوان خطا به کنترل کننده داده می‌شود، یک بردار مطابق بردار $\overline{e_{im}}$ در شکل ۱۵ است. مؤلفه افقی این بردار در ادامه توسط کنترل کننده برای کنترل گردش (زاویه ψ) و مؤلفه قائم آن برای کنترل سرعت در راستای محور z بدنی استفاده می‌شود. هدایت ریزپرنده در راستای x بدنی به مراتب آسان‌تر است. به



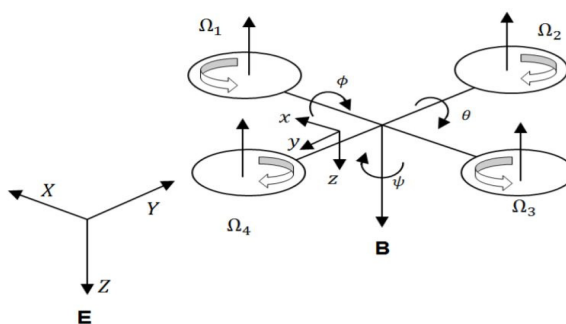
شکل ۱۵. نحوه هدایت تصویری ارتفاع و زاویه گردش ریزپرنده نسبت به مستطیل ردیابی شده شامل مقطع عبور

Fig. 15. The guidance of the MAV altitude and heading relative to the bounding box containing the cross section



شکل ۱۶. مسیر پیموده شده توسط ریزپرنده انبارگرد متعارف (مسیر SBT) و مسیر طراحی شده توسط سامانه حاضر (SAT)

Fig. 16. The present warehouse MAV path (SAT) compared to a conventional warehouse MAV path (SBT)



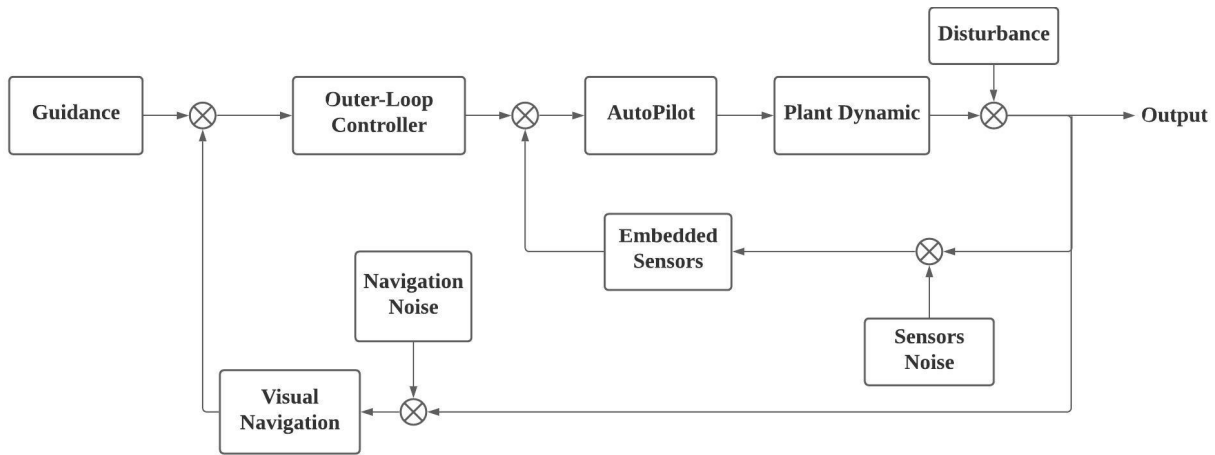
شکل ۱۷. هندسه نمادین چهارپره و دستگاه مختصات بدنی (B) و محلی (E)

Fig. 17. A schematic quadrotor geometry with body frame (B) and local frame (E)

شناخت مدل دینامیکی می‌باشد. با استفاده از قانون پایستگی تکانه خطی و زاویه‌ای و با در نظر داشتن هندسه چهارپره مطابق شکل ۱۷، می‌توان برای سه راستای مختصات به شش معادله دست یافت. معادلات (۹-آ) تا (۹-ج) مدل دینامیکی چهارپره را در دستگاه محلی E و معادلات (۹-د) تا (۹-و) در دستگاه بدنی B نشان می‌دهند.

۴-۴- کنترل

در کنترل ریزپرنده‌ها، معمولاً فرمان‌های نخستین توسط خلبان یا کنترل‌کننده مستقل تولید شده و به عنوان ورودی به خلبان خودکار نصب بر وسیله داده می‌شود. خلبان خودکار وظیفه دارد ورودی داده شده را به نحوی برای وسیله ترجمه نماید که منجر به رفتار دینامیکی مطلوب گردد. طراحی کنترل برای ریزپرنده نیازمند



شکل ۱۸. دیاگرام کنترل حلقه‌بسته ریزپرنده
Fig. 18. The warehouse MAV closed loop control diagram

می‌تواند به صورت مستقل از ساختار کنترل حرکت نصب‌شده بر ریزپرنده طراحی شده باشد.

در نمودار شکل ۱۸ داده اصلی پسخور در حلقه خارجی کنترل (خروجی جعبه نوابری تصویری^۵)، اطلاعات شش درجه آزادی موقعیت است. اختلاف این داده‌ها با نقطه تنظیم ورودی اصلی کنترل‌کننده خارجی، و خروجی آن سه سرعت انتقالی و سرعت زاویه‌ای گردش است. جعبه خلبان خودکار^۶ در شکل ۱۸ خود شامل دو حلقه داخلی کنترل سرعت انتقالی و زاویه و همچنین حلقه‌ای مستقل برای کنترل ارتفاع است. شکل ۱۸ همچنین شامل سیگنال‌های اغتشاش^۷ و نویز نیز هست. به طور مثال، اثر باد یک اغتشاش محسوب می‌شود. سیگنال نویز نیز آثار محیطی سوء روی حسگرها و فرایندهای اندازه‌گیری را نشان می‌دهند. برای تصریح محتوی شکل ۱۸، خروجی و ورودی هر یک از جعبه‌ها در شکل ۱۸ در جدول فهرست شده‌اند. به جهت اختصار، جعبه‌هایی که دارای خروجی یا ورودی از جنس مشترک با خروجی یا ورودی جعبه‌های دیگر هستند در جدول ۱ ذکر نشده‌اند. بدیهی است، کلیه سیگنال‌های مسیر پسخور، داده اندازه‌گیری شده حسگرها و کلیه سیگنال‌های پیشخور تفاضل داده اندازه‌گیری شده و مقدار موردنظر هر کمیت را شامل می‌شوند.

۴-۴-۱- قانون کنترلی در راستای X

جعبه کنترل‌کننده حلقه خارجی در شکل ۱۸، شامل چهار قانون

(۹)

$$\ddot{x} = \psi + \phi \psi \frac{1}{m} U_1 \quad (\text{آ})$$

$$\ddot{y} = (\cos \phi \sin \theta \sin \psi + \sin \phi \cos \psi) \frac{1}{m} U_1 \quad (\text{ب})$$

$$\ddot{z} = -g + (\cos \phi \cos \theta) \frac{1}{m} U_1 \quad (\text{ج})$$

$$\ddot{\phi} = \dot{\theta} \psi \frac{I_y - I_z}{I_x} + \frac{J_r}{I_x} \dot{\theta} \Omega + \frac{1}{I_x} U_2 \quad (\text{د})$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi} \psi \frac{I_z - I_x}{I_y} - \frac{J_r}{I_y} \dot{\phi} \Omega + \frac{1}{I_y} U_3 \quad (\text{ه})$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\phi} \dot{\theta} \frac{I_x - I_y}{I_z} + \frac{1}{I_y} U_4 \quad (\text{و})$$

در معادلات (۹) مشاهده می‌شود که متغیرهای حالت سه سرعت انتقالی و سه سرعت زاویه‌ای حول سه راستای دستگاه مختصات هستند. همچنین در این معادلات، U_1 ، U_2 ، U_3 و U_4 به ترتیب پیشرانش، گشتاور چرخش^۱، پیچش^۲ و گردش^۳ می‌باشند. برای اثبات و تشریح معادلات (۹) به منابع زیادی از جمله [۲۴] می‌توان مراجعه نمود. شکل ۱۸ نمودار کنترل حلقه‌بسته ریزپرنده را به نمایش می‌گذارد. در نمودار شکل ۱۸، جعبه کنترل‌کننده حلقه خارجی^۴ نمایانگر کنترل‌کننده خارجی است که در نرم‌افزارهای غیرنصب،

5 Visual navigation
 6 Autopilot
 7 Disturbance

1 Roll
 2 Pitch
 3 Yaw
 4 Outer-loop controller

جدول ۱. ورودی و خروجی اجزاء نمودار کنترلی حلقه بسته
Table 1. Input and output of closed loop control diagram components

خروجی	ورودی	جعبه
بردار (x, y, z, ψ)	---	هدایت ^۱
بردار $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\psi})$	بردار (x, y, z, ψ)	کنترل کننده حلقه خارجی
سرعت زاویه‌ای هر یک از چهار ملخ	بردار $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\psi})$	خلبان خودکار
کلیه پارامترهای حرکتی (موقعیت، سرعت، شتاب)	سرعت زاویه‌ای هر یک از چهار ملخ	دینامیک وسیله ^۲

¹ Guidance

² Plant dynamics

$$\dot{\psi} = k_{\Delta\psi} f \tan e_{\psi} \quad (13)$$

در رابطه (۷)، f فاصله کانونی، $k_{\Delta\psi}$ بهره کنترلی (هر دو ثابت) و e_{ψ} خطای زاویه گردش می‌باشند. اگر رفتار ماندگار سامانه را در شرایطی که زاویه گردش دوربین نسبت به شیء تقریباً تنظیم شده و اختلافات کوچک آن توسط کنترل کننده رفع می‌شود در نظر بگیریم، آنگاه برای زوایای کوچک، می‌توان تقریب خطی به صورت رابطه (۱۴) را در نظر گرفت. به این ترتیب قانون کنترلی تناسبی-انتگرالگیر برای سرعت گردش به صورت رابطه (۱۵) به دست می‌آید.

$$\tan e_{\psi} = e_{\psi} \quad (14)$$

$$\dot{\psi} = k_{P,\psi} e_{\psi} + k_{I,\psi} \int_0^t e_{\psi} dt \quad (15)$$

۴-۴-۴- قانون کنترلی در راستای y

برای کنترل موقعیت عرضی y ، به فراخور زاویه ψ موجود در داده ناوبری، با راهبرد کنترلی بنگ-آف-بنگ^۲ [۲۵]، سرعت در راستای y بر حسب مؤلفه ψ با توزیعی مشابه نمودار شکل ۱۹ در خروجی کنترل کننده تولید می‌شود. در نمودار شکل ۱۹، زاویه ψ حداقل اندازه زاویه گردش است که مطابق با علامت آن، مقدار سرعت مثبت یا منفی سرعت ثابت V_y به ریزپرنده داده می‌شود.

۵- نتایج آزمایش

برای سنجش کارایی سامانه ریزپرنده انبارگرد، لازم است آزمایشی

کنترلی برای هر یک از چهار مؤلفه x, y, z و ψ است. این قانون کنترلی در راستای x ، به صورت سرعتی ثابت، همانند رابطه (۱۰) می‌باشد.

$$\dot{x} = \dot{x}_0 \quad (10)$$

۴-۴-۲- قانون کنترلی در راستای Z

در توضیح شکل ۱۵ گفته شد که فاصله پیکسلی نقطه روبه‌روی دوربین با مرکز سلول در تصویر دوربین بر حسب پیکسل (Δy_{im}) به عنوان پس‌خور به کنترل کننده داده می‌شود. اگر فرض کنیم که این فاصله پیکسلی دارای رابطه خطی به صورت رابطه (۱۱) با خطای موقعیت (e_z) در راستای Z فضای سه‌بعدی باشد، آنگاه با در نظر گرفتن راهبرد کنترلی تناسبی-انتگرالگیر^۱، قانون کنترلی در راستای Z به صورت رابطه (۱۲) به دست خواهد آمد.

$$\Delta y_{im} = k_e e_z \quad (11)$$

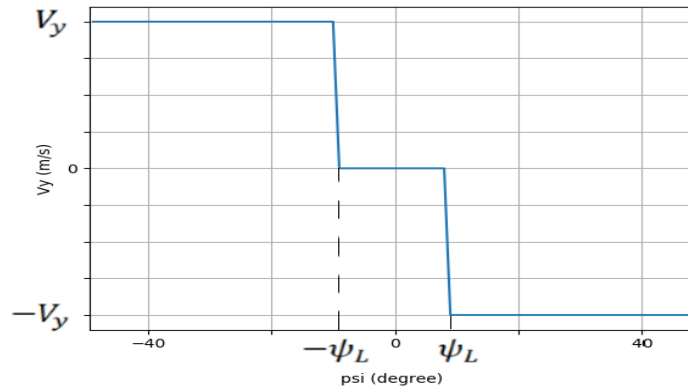
$$\dot{z} = k_{P,\Delta y} \Delta y_{im} + k_{I,\Delta y} \int_0^t \Delta y_{im} dt = k_{P,\Delta y} k_e e_z + k_{I,\Delta y} \int_0^t k_e e_z dt = k_{P,z} e_z + k_{I,z} \int_0^t e_z dt \quad (12)$$

۴-۴-۳- قانون کنترلی ψ

اگر فاصله پیکسلی افقی ($X\Delta$) در شکل ۱۵ را به عنوان پس‌خور کنترل زاویه گردش ψ در نظر بگیریم، آنگاه قانون کنترلی تناسبی زاویه گردش به صورت رابطه (۱۳) به دست خواهد آمد.

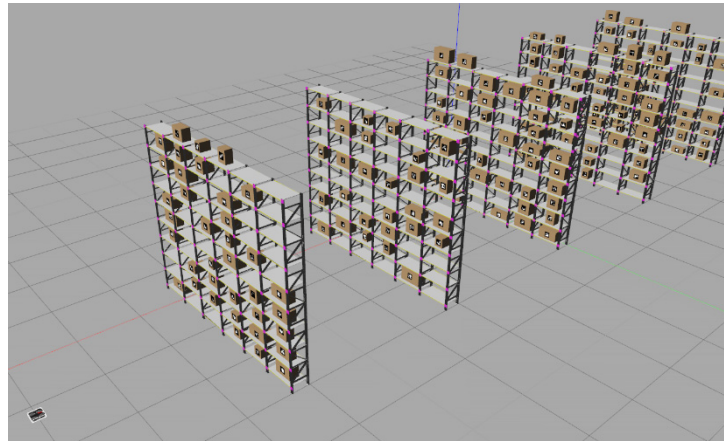
2 Bang-off-bang

1 Proportional-Integral (PI)



شکل ۱۹. فرمان سرعت در راستای y برحسب زاویه گردش اندازه‌گیری شده نسبت به مقطع عبور

Fig. 19. y -direction velocity command in terms of measured heading angle relative to the cross section



شکل ۲۰ فضای انبار شبیه‌سازی شده

Fig. 20. The simulated warehouse

برنامه‌ها تحت میان‌افزار رأس^۲ اجرا شده‌اند که مسئولیت برهمکنش واحدهای اصلی سامانه و همچنین تعامل میان نرم افزار و شبیه ساز در مرحله شبیه سازی و یا تعامل میان نرم افزار و سخت افزار در مرحله آزمایش عملی را بر عهده دارد. برای شبیه سازی سامانه، از شبیه ساز گرافیکی سه بعدی گزبو^۳ استفاده شده است. این شبیه ساز مخصوص شبیه سازی ربات‌ها بوده و برای طراحی سامانه‌های ریزپرنده در سطح انتزاعی دارای کاربرد گسترده است. شکل ۲۰ فضای انبار شبیه‌سازی شده را به همراه ریزپرنده به نمایش می‌گذارد. برای آزمایش سامانه در این بستر، یک نسخه آماده شبیه سازی شده از ریزپرنده ای‌آردرون^۴ محصول شرکت پروت^۵ به کار رفته است.

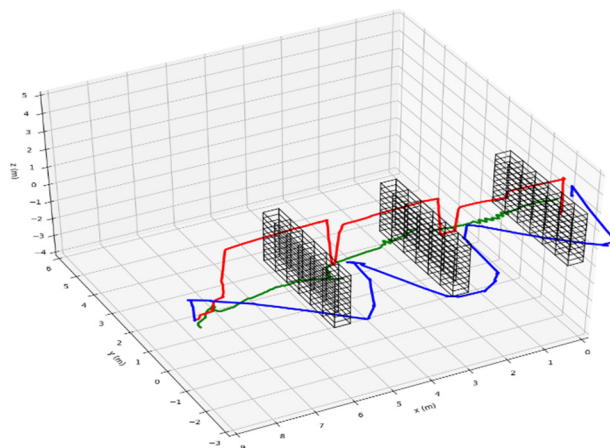
طراحی شود که در آن کارآیی اجزاء به صورت برآیند، در موفقیت آزمایش بازتاب یابد. این کار ابتدا در محیط شبیه‌سازی و سپس در فضای واقعی صورت گرفته است. در ادامه، پس از گزارش مختصری از شبیه‌سازی انجام‌گرفته، به بیان آزمایش پرواز در فضای واقعی و ارائه خروجی‌ها خواهیم پرداخت.

۵-۱- شبیه‌سازی

سامانه پیش از این به صورت مجموعه‌ای از واحدهای نرم افزاری جداگانه که همانند شکل ۳ با هم برهمکنش دارند معرفی شد. هر یک از واحدهای طرحواره شکل ۲۰ در عمل شامل یک یا چند برنامه نرم افزاری است که به صورت مدولار^۱ با هم تعامل دارند. کلیه

2 ROS
3 Gazebo
4 AR Drone 2.0
5 Parrot

1 Modular



شکل ۲۱. مقایسه مسیر ریزپرنده با الگوریتم هدایتی حاضر و هدایت متداول

Fig. 21. A comparison between the path generated by the present guidance algorithm and the conventional guidance algorithms

جدول ۲. ارزیابی زمان و مسافت پیموده شده ریزپرنده طی مسیر بهینه روش حاضر و مسیرهای متداول

Table 2. Evaluation of the MAV flight time and distance caused by the present method optimal path and conventional methods

روش طراحی مسیر	میانگین زمان سپری شده (ثانیه)	میانگین مسافت طی شده (متر)
مسیر بهینه (عبور از قفسه)	۲۴۰	۱۴
مسیر متداول از بالای قفسه‌ها	۳۰۰	۲۲
مسیر متداول از جنب قفسه‌ها	۳۶۰	۲۸

که عمل آمارگیری انبار، تکرار همین کار است، لذا موفقیت کامل در این کار به مثابه موفقیت در مأموریت طراحی شده می‌باشد. آزمایش به این صورت است که یک قفسه با ابعاد معلوم تهیه شده و به صورت نمادین، نشانگرهای نماینده بسته‌ها در بعضی از سلول‌های آن قرار داده شده‌اند. روی محل تقاطع سلول‌ها برچسب‌های رنگی قرار داده شده است. عرض سلول‌های دو ستون مجاور با هم متفاوت بوده و کلیه اطلاعات هندسی قفسه موجود است. لذا می‌توان به شرحی که پیش از این آمد، با داشتن شماره سطر و ستون هر سلول، داده‌های ناوبری تصویری لازم را به دست آورد. شکل ۲۲ نمایی از قفسه آزمایش را نشان می‌دهد.

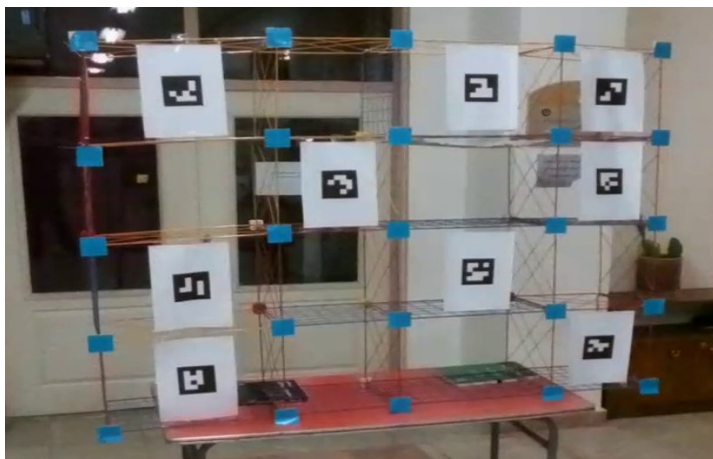
ریزپرنده آزمایش، ریزپرنده تجاری مدل تلولا^۱ ساخته شرکت دی جی آی^۲ است. این ریزپرنده دارای وزن کم و اندازه کوچکی بوده و برای پرواز در شرایط داخل ساختمان مناسب است. از دید کنترلی،

مجموعه‌ای از ارزیابی‌ها که امکان انجام آنها با پیاده‌سازی در واقعیت فعلاً وجود نداشته است به شبیه‌ساز محول شده‌اند. مهم‌ترین ارزیابی مختص شبیه‌ساز، موضوع ارزیابی زمان و طول مسیر کلی ریزپرنده در کل فضای انبار است. شکل ۲۱ مسیر پیموده شده در نتیجه الگوریتم هدایتی حاضر را در قیاس با یک الگوریتم هدایتی متداول نشان می‌دهد. در شکل ۲۱ مسیر سبز رنگ مسیر طی شده ریزپرنده در طول شبیه‌سازی با الگوریتم هدایتی سامانه حاضر و مسیر سرخ رنگ و آبی رنگ نتیجه الگوریتم هدایتی متداول می‌باشند. جدول ۲ جمع‌بندی روشی در خصوص نیل به هدف بهینه سازی مسیر حرکت ریزپرنده انبارگرد نسبت به روش‌های هدایت متداول به نمایش می‌گذارد.

۵-۲- پیاده‌سازی

برای این کار، توانایی سامانه در عبور ریزپرنده از داخل یکی از قفسه‌های شکل ۱ طی آزمایشی سنجیده شده است. با توجه به این

1 Tello
2 DJI



شکل ۲۲. قفسه آزمایش
Fig. 22. The flight test shelf



شکل ۲۳. ریزپرنده آزمایش
Fig. 23. The flight test MAV

جدول ۳. ویژگی‌های هندسی قفسه آزمایش
Table 3. Geometric details of the flight test shelf

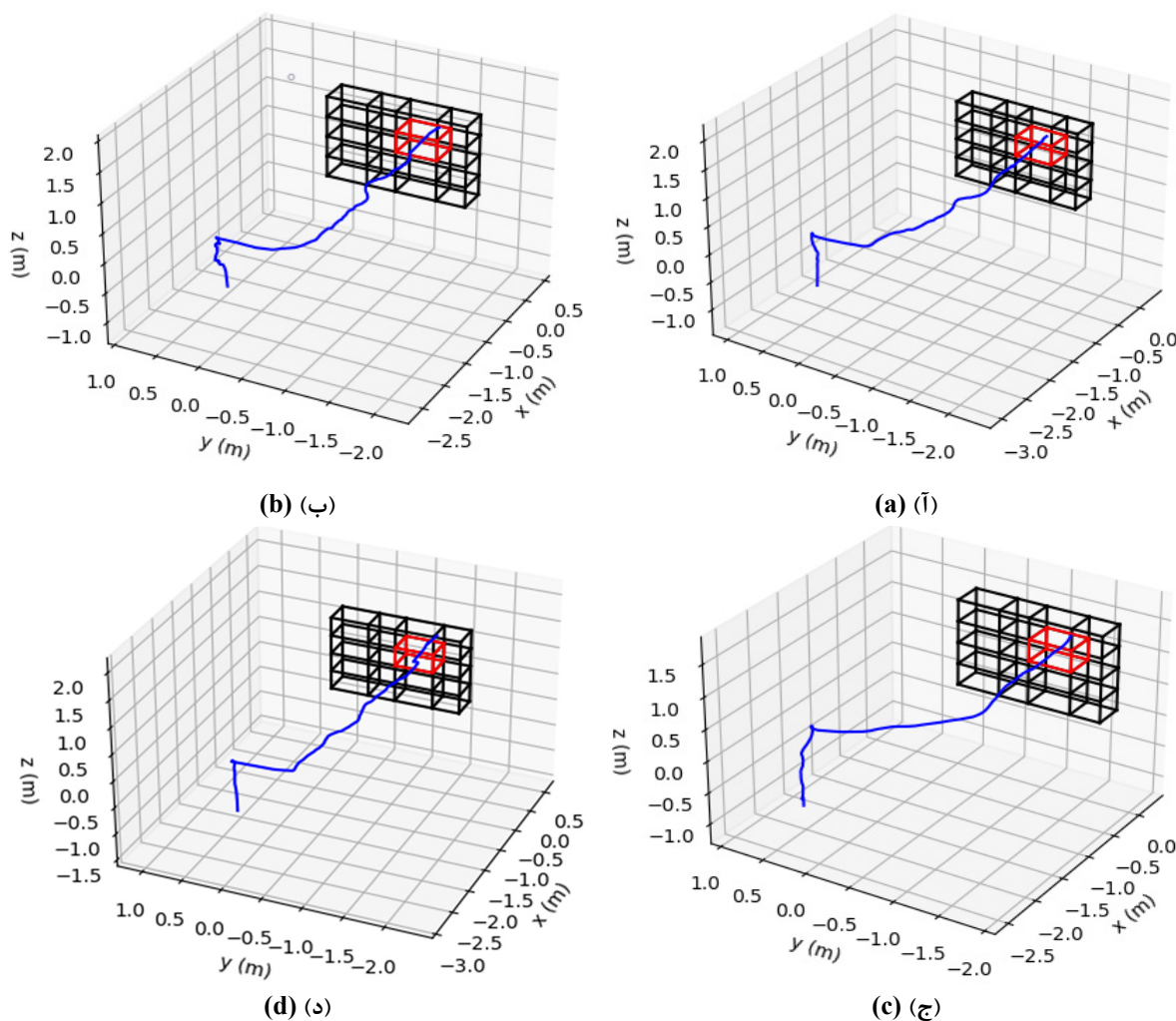
مقدار	ویژگی
۴ × ۴	ابعاد ماتریس سلول‌های قفسه
۳۴ cm × ۳۴ cm × ۳۴ cm	ابعاد هر سلول ستون باریک
۴۸ cm × ۳۴ cm × ۳۴ cm	ابعاد هر سلول ستون پهن
۶ cm × ۶ cm	ابعاد برچسب‌های رنگی
۱۰ cm × ۱۰ cm	ابعاد نشانگرها

آزمایش به این صورت است که ریزپرنده در فاصله‌ای بین ۲/۵ تا ۳/۵ متر از وجه روبه‌روی قفسه روی زمین قرار گرفته است. پس از فرمان برخاست، از روی زمین بلند شده و ابتدا در موقعیت و وضعیت دید بهینه نسبت به قفسه قرار می‌گیرد. سپس فهرست سلول‌های حاوی بسته‌های فرضی به همراه شناسه آنها را تهیه می‌نماید. در

نظر به تجاری بودن ریزپرنده، بخش خلبان خودکار از نمودار شکل ۱۸ به صورت تعبیه‌شده بر روی وسیله مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲۳ نمای ریزپرنده آزمایش را نشان می‌دهد. جدول ۳ خلاصه‌ای از داده‌های مربوط به قفسه آزمایش و جدول ۴ اطلاعاتی در مورد ریزپرنده آزمایش را شامل می‌شوند.

جدول ۴. برخی اطلاعات مربوط به ریزپرنده آزمایش
Table 4. Geometric details of the flight test shelf

مؤلفه	مقدار
ابعاد	۹۸ mm × ۹۲/۵ mm × ۴۱ mm
جرم	۸۰ g
مداومت پروازی	۱۳ min
سرعت بیشینه	۸ m/s
کیفیت تصویر دوربین	۵ megapixel (۲۵۹۲ pixel × ۱۹۳۶ pixel)



شکل ۲۴. نمودار سه بعدی داده‌های ناوبری حاصل از پرواز ریزپرنده انبارگرد در چهار آزمایش پرواز مختلف
Fig. 24. The three-dimensional navigation data diagram in four different flight tests

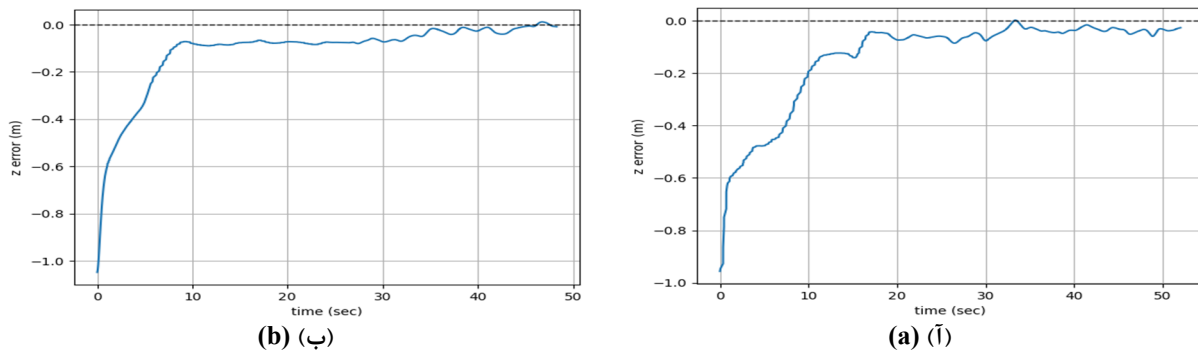
درست و عبور از قفسه بدون برخورد وسیله با موانع مسیر است. نتیجه آزمایش در نمودارهای شکل ۲۴ مشهود است. در هر نمودار شکل ۲۴ داده عددی ناوبری در طی چهار پرواز موفق، به همراه موقعیت قفسه

ادامه، نزدیک‌ترین سلول خالی را انتخاب می‌کند. با استفاده از ناوبری و هدایت تصویری، ریزپرنده به سلول مورد نظر نزدیک شده و از داخل آن عبور می‌کند. موفقیت در این آزمایش به این معنا ثبت اطلاعات

Package ID	Row Number	Column Number
11	1	1
24	1	3
42	1	4
46	2	2
58	2	4
61	3	1
64	3	3
81	4	1
88	4	4

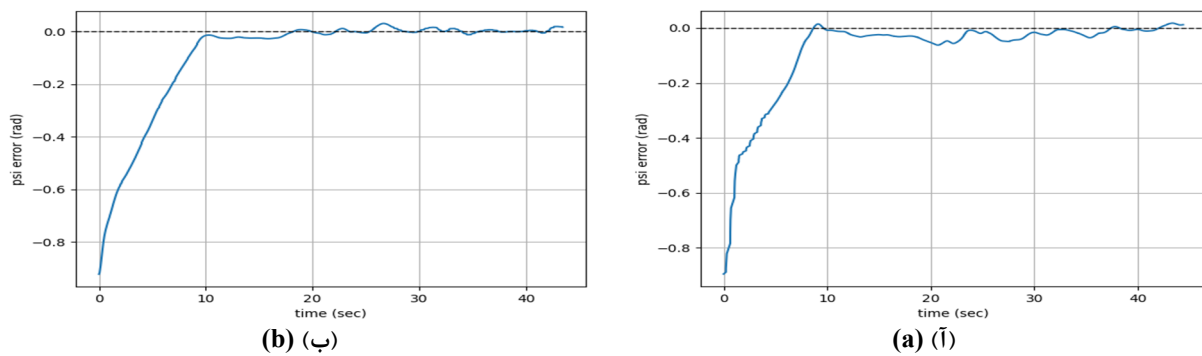
شکل ۲۵. نمونه فهرست بسته‌های موجود در قفسه انبار که به صورت لحظه‌ای استخراج شده است

Fig. 25. An instantly extracted sample list of packages on the shelf



شکل ۲۶. پاسخ زمانی موقعیت قائم ریزپرنده انبارگرد در نتیجه کنترل ارتفاع

Fig. 26. The time response of the MAV vertical position as a result of altitude control



شکل ۲۷. پاسخ زمانی زاویه گردش ریزپرنده انبارگرد در نتیجه کنترل گردش حول محور قائم

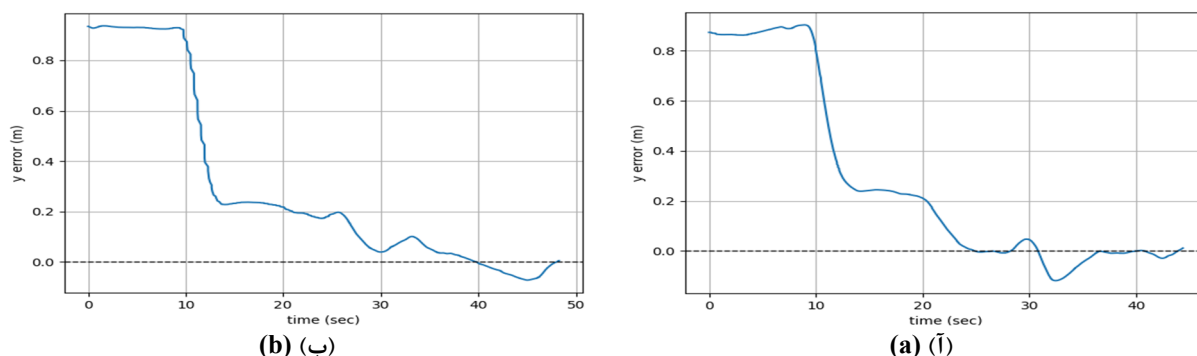
Fig. 27. The time response of the MAV heading angle as a result of z -axis angle control

که با توجه به نیروی پسای آیرودینامیکی وارده بر ریزپرنده در تغییر ارتفاع و دینامیک وسیله طبیعی است. در مورد عدم اصلاح موقعیت عرضی در پاسخ زمانی ψ در ثانیه‌های ابتدایی، باید اشاره نمود که این بخش از نمودار، مربوط به مرحله قرارگیری در موقعیت دید بهینه از مسیر ریزپرنده انبارگرد است که در آن هدف قرار گرفتن تمام قفسه در میدان دید دوربین بوده و تنظیم عرضی ریزپرنده دارای اهمیت چندانی نمی‌باشد.

و همچنین سلول هدف ترسیم شده است.

شکل‌های ۲۶ تا ۲۸ در بردارنده پاسخ زمانی سامانه در کنترل سه مؤلفه z و ψ در دو پرواز موفق است. مشاهده می‌شود که در هر سه مورد، خطای سامانه به سمت صفر میل کرده و سامانه رفتار پایداری از خود نشان داده است. در مورد تنظیم زاویه گردش، مشاهده می‌شود که زمان نشست^۱ نسبت به تنظیم ارتفاع کمتر است

1 Settling time



شکل ۲۸. پاسخ زمانی موقعیت عرضی ریزپرنده انبارگرد در نتیجه فرایند عمودی‌سازی مسیر ریزپرنده نسبت به قفسه و کنترل موقعیت عرضی
 Fig. 28. The time response of the MAV lateral position as a result of lateral position control and path verticalization

جدول ۵. مقایسه حدودی زمان صرف‌شده آمارگیری یک انبار با ۵ قفسه متوالی توسط انسان و ریزپرنده انبارگرد

Table 5. An estimated comparison of the time spent for an inventory of a warehouse with 5 shelves by the warehouse MAV system and a human

مرحله عملیات آمارگیری	زمان صرف‌شده توسط انسان	زمان صرف‌شده توسط ریزپرنده انبارگرد
قرارگیری در موقعیت دید کافی در برابر قفسه	۱۰ sec	۳۰ sec
شناسایی بسته‌ها و شماره سطر و ستون هر بسته	۶۰ sec	۰/۰۳ sec
ثبت اطلاعات	۶۰ sec	۰/۰۳ sec
حرکت بین قفسه‌ها تا قفسه بعدی	۵۰ sec	۳۰ sec
کل زمان صرف‌شده برای یک قفسه	۵ min	۱ min
کل زمان صرف‌شده برای تعداد ۵ قفسه	۱۵ min	۵ min

ارائه و پیاده‌سازی شد. نتایج آزمایش حکایت از موفقیت اجزاء سامانه از قبیل واحد بینایی رایانه و واحد هدایت خودکار دارد. در مرحله اول هدایت، قرارگیری ریزپرنده به صورت کاملاً خودکار در مقابل قفسه انجام می‌گیرد. در مرحله دوم، ریزپرنده بدون نیاز به دور زدن مانع قفسه و از کوتاه‌ترین مسیر، از داخل آن عبور می‌کند که موجب سرعت بخشیدن به عملیات می‌شود. دقت ناشی از ناوبری تصویری و عملکرد کنترل حلقه‌بسته به صورتی است که هنگام قرارگیری ریزپرنده در برابر مقطع عبور، کنترل حلقه باز با استفاده از آخرین داده ناوبری تصویری در دسترس، می‌تواند موجب عبور ریزپرنده از داخل قفسه بدون برخورد با آن شود. لذا می‌توان گفت سامانه طراحی شده قادر به تأمین مولفه‌های اصلی مورد نظر در خصوص کیفیت اجرای مأموریت است.

در بخش ۱ سه شاخصه اصلی ارزان بودن، عدم اتکا بر چند حسگر و پیروی از مسیر بهینه به عنوان نوآوری‌های سامانه در مقایسه با

برای جمع‌بندی، جدول ۵، نگاهی اجمالی به زمان (و به صورت متناسب با آن توان) صرف‌شده برای عمل آمارگیری انبار توسط انسان در مقایسه با انجام همین کار توسط ریزپرنده انبارگرد دارد. داده‌های زمانی مربوط به انسان تخمین، و داده‌های زمانی مربوط به ریزپرنده مستخرج از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده هستند. مطابق جدول ۵، برای یک انبار با نقشه‌ای مشابه شکل ۱، زمان صرف‌شده توسط ریزپرنده انبارگرد برای آمارگیری کل بسته‌ها در مقایسه با انسان، به یک سوم کاهش می‌یابد. با توجه به تناسب مستقیم زمان با توان و هزینه، می‌توان مدعی شد که سامانه به هدف اصلی «به‌صرفه‌بودن» کار ریزپرنده انبارگرد نسبت به کار انسان نائل آمده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سامانه آمارگیری انبار به وسیله ریزپرنده، با توانایی هدایت کاملاً خودکار و مبتنی بر داده‌های تصویری یک دوربین

کارهای مشابه بیان شد. در خصوص دو شاخصه نخست، باید گفت که ریزپرنده‌ای که پیاده‌سازی آزمایش با آن صورت گرفته است یکی از ارزان‌ترین ریزپرنده‌های در دسترس بوده است. همچنین مشاهده شد که کل الگوریتم با ورودی دریافت شده تنها دوربین جلو کار کرده و هیچ گونه اتکایی بر حسگرهای دیگر وجود ندارد. انتخاب‌های انجام گرفته در طراحی سامانه، چه در مورد گزینش فضای آزمایش و یا ریزپرنده، و چه از نظر الگوریتم، همگی با هدف یک سامانه کم هزینه انجام شده است. در ارتباط با خاستگاه این هدف‌گذاری، شاید بهترین توضیح این باشد که پژوهش‌های انجام گرفته در طول کار نشان داده است که متقاضیان و تولیدکنندگان سامانه‌های هوشمند مدیریت انبار، بیشتر در کشورهای توسعه یافته بوده‌اند. اگر از دیدگاه پیاده سازی چنین امکاناتی در فضای اقتصادی کشورهای در حال توسعه به آن نگریسته شود، هدفگذاری برای یک راه حل ارزان منطقی به نظر می‌رسد. اما درباره شاخص سوم، این که در سامانه مسیر بهینه طی می‌شود طبق آنچه گفته شد روشن است. علاوه بر آن، در شرایطی که سرعت ثابتی برای پرواز ریزپرنده در نظر گرفته شود، می‌توان ادعا نمود که با توجه به کمینه‌بودن طول مسیر، الگوریتم از لحاظ زمانی نیز بهینه است. البته نیل به این هدف نیازمند آن است که امنیت پرواز در سامانه چنان افزایش یابد، که خطر برخورد با قفسه قیدی بر روی اندازه سرعت ریزپرنده در مقایسه با مسیرهای بی‌خطر متداول ایجاد ننماید.

۷- زمینه‌های توسعه

در مورد زمینه‌های توسعه سامانه ریزپرنده انبارگرد، دیدگاه تجاری‌سازی، به طور مثال شناسایی بسته‌ها با استفاده از نشانگرها ممکن است غیرمتداول به نظر برسد. در حالت عادی، بسته‌های موجود در انبارها و بایگانی‌ها، با رمزهای حرفی یا عددی قابل خواندن برای انسان شناسایی می‌شوند. الگوریتم‌های بینایی رایانه امروزی دارای توانایی کافی برای شناسایی متن به صورت برخط، به طور مشابه آنچه آمد می‌باشند. بنابراین افزودن این امکان به سامانه فعلی کاری ساده به نظر می‌رسد. در مورد شناسایی قفسه، می‌توان برچسب‌ها را به صورت ترکیب دو رنگ، یا ترکیب هندسی خاصی از سفید و سیاه در نظر گرفت. این کار موجب می‌شود که در صورت وجود اشیاء هم‌رنگ، شناسایی قفسه‌ها با اختلال مواجه نشود. مورد اخیر در

خصوص کاربرد تجاری سامانه ضروری به نظر می‌رسد. از دید تحقیقاتی، افزایش سرعت یا مانورپذیری سامانه می‌تواند جذاب‌تر باشد. سامانه حاضر در سرعت‌های کم و متوسط کارآ است. همچنین در مورد ریزپرنده‌هایی که دوربین آنها دارای زاویه نصب و محدودیت دید باشد، ممکن است مسیر طی شده با دوربین کور در مرحله عبور از قفسه طولانی‌تر شود. با الگوریتم فعلی، در خصوص شرایطی که داده تصویری موجود نباشد، یا مانور خاصی در حرکت وجود داشته‌باشد، محدودیت وجود دارد. افزایش قابلیت‌های سامانه در این زمینه بیشتر در حوزه کارهای نمایشی و یا مسائل دارای کاربردهای متفاوتی چون امداد و نجات مفید است. برای این کار، ترکیب یک ناوبری مستقل از تصویر، و یا مدل حرکت سه‌بعدی ریزپرنده با داده تصویری با استفاده از الگوریتم‌های معتبری ترکیب حسگرها چون فیلتر کالمن پیشنهاد می‌شود.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

نسبت مساحت کوچکترین به بزرگترین برچسب در تصویر	AR
مجموعه نقاط ستون شماره k	C_k
بردار متصل‌کننده مرکز تصویر به نقطه هدف در مختصات تصویر	e_{im}
خطای موضعیت Z و زاویه ψ	e_z, e_ψ
فاصله کانونی دوربین	f
فاصله عمودی دو سطر مجاور از جدول نقاط	h
گشتاور لختی حول محور X, Y و Z	I_x, I_y, I_z
بهره کنترلی تناسبی، بهره کنترلی انتگرالگیر	k_p, k_I
مساحت کوچکترین برچسب در تصویر	LT
ماتریس پارامترهای داخلی دوربین	M_{in}
ماتریس پارامترهای خارجی دوربین	M_{ex}
مختصات نقطه در دستگاه مختصات واقع بر دوربین	p
مختصات نقطه در دستگاه مختصات محلی	P
ماتریس چرخش میان دو دستگاه مختصات	R
مجموعه نقاط سطر شماره k	R_k

- for Rectangle Detection Using Corners, in: Proceedings of the International Conference on Video and Image Processing, 2017, pp. 15-19.
- [4] E.-S. Yang, G.-W. Kim, Robust quadrilateral detection method for using rectangle feature, in: 2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), IEEE, 2017, pp. 349-351.
- [5] Z. Zhang, A. Ganesh, X. Liang, Y. Ma, TILT: Transform invariant low-rank textures, International journal of computer vision, 99(1) (2012) 1-24.
- [6] Y. Bi, M. Lan, J. Li, S. Lai, B.M. Chen, A lightweight autonomous MAV for indoor search and rescue, Asian Journal of Control, 21(4) (2019) 1732-1744.
- [7] M. Blösch, S. Weiss, D. Scaramuzza, R. Siegwart, Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments, in: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2010, pp. 21-28.
- [8] K. Schmid, T. Tomic, F. Ruess, H. Hirschmüller, M. Suppa, Stereo vision based indoor/outdoor navigation for flying robots, in: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2013, pp. 3955-3962.
- [9] J. Marzat, J. Moras, A. Plyer, A. Eudes, P. Morin, Vision-based localization, mapping and control for autonomous MAV: EuRoC challenge results, in, 2015.
- [10] C. Bills, J. Chen, A. Saxena, Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues, in: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2011, pp. 5776-5783.
- [11] S. Zingg, D. Scaramuzza, S. Weiss, R. Siegwart, MAV navigation through indoor corridors using optical flow, in: 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2010, pp. 3361-3368.
- [12] S.L. Smith, M. Schwager, D. Rus, Persistent robotic tasks: Monitoring and sweeping in changing environments, IEEE Transactions on Robotics, 28(2) (2011) 410-426.
- [13] N. Mathew, S.L. Smith, S.L. Waslander, Planning paths for package delivery in heterogeneous multirobot teams, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 12(4) (2015) 1298-1308.
- بردار یکه راستای چرخش میان دو دستگاه مختصات \vec{r}
- مولفه‌های بردار چرخش میان دو دستگاه مختصات روی راستای X، Y و Z r_x, r_y, r_z
- مساحت بزرگترین برچسب در تصویر ST
- زمان t
- ماتریس انتقال میان دو دستگاه مختصات \bar{T}
- نیروی پیشرانش چهارپره U_1
- گشتاور چهارپره در چرخش، پیچش و گردش U_τ, U_γ, U_ϕ
- فاصله افقی دو ستون مجاور از جدول نقاط w
- فاصله پیکسلی مرکز تصویر با نقطه هدف در راستای X و Y مختصات تصویر $\Delta x_{im}, \Delta y_{im}$
- بیشینه فاصله نقاط هم سطر یا هم ستون $x_{lim}, \Delta y_{lim}, \Delta$
- علائم یونانی**
- اندازه زاویه چرخش میان دو دستگاه مختصات حول بردار یکه چرخش α
- زاویه پیچش حول محور X، زاویه دوران جدول نقاط θ
- حداکثر زاویه دوران جدول نقاط برای کاربرد روش دسته‌بندی پله‌ای $L\theta$
- زاویه چرخش حول محور Y ϕ
- زاویه گردش حول محور Z ψ
- کمینه اندازه زاویه گردش برای تولید فرمان سرعت در راستای Y جهت عمودی‌سازی مسیر ψ_L
- ماتریس مدل افکنش سه‌بعدی نقطه‌ای Π

مراجع

- [1] R.F. Chapman, H.D. Mathias, Computer Vision Based Object Detection and Tracking in Micro Aerial Vehicles, Papers & Publications: Interdisciplinary Journal of Undergraduate Research, 5(1) (2016) 7.
- [2] M. Neto, G. Eduardo, E. Silva, W. Caarls, Computer Vision Based Solutions for MAV Target Detection and Flight Control, in: 10th International Micro-Air Vehicles Conference, Melbourne, Australia, 2018.
- [3] S. Wu, L. Gou, H. Xiong, X. Li, A Graph-based Approach

- powered wireless backbone for drone-based inventory management, *Sensors*, 19(3) (2019) 467.
- [20] D. Saha, G.S.B. Udayagiri, P. Agarwal, B. Ghosh, S. Kumar, Warehouse Management Using Real-Time QR-Code and Text Detection.
- [21] I. Kalinov, A. Petrovsky, Cnn barcode detection-based uav trajectory optimization for autonomous warehouse stocktaking, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4) (2020) 6647-6653.
- [22] M. Maurer, J. Pestana, Towards an autonomous vision-based inventory drone, in: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2018.
- [23] D. Cristiani, F. Bottonelli, Inventory Management through Mini-Drones: Architecture and P-o-C Implementation, in: 2020 IEEE 21st International Symposium on "A World of Wireless Networks", IEEE, 2020, pp. 317-322.
- [24] T. Bresciani, Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter, MSc Theses, (2008).
- [25] E. Donald, KIRK, "Optimal Control Theory", AN INTRODUCTION, (1970).
- [14] M. Popp, S. Prophet, G. Scholz, G. Trommer, A novel guidance and navigation system for MAVs capable of autonomous collision-free entering of buildings, *Gyroscopy and Navigation*, 6(3) (2015) 157-165.
- [15] W.G. Aguilar, V.P. Casalgilla, J.L. Polit, Obstacle avoidance based-visual navigation for micro aerial vehicles, *Electronics*, 6(1) (2017) 10.
- [16] A. De Falco, F. Narducci, An UAV autonomous warehouse inventorying by deep learning, in: International Conference on Image Analysis and Processing, Springer, 2019, pp. 443-453.
- [17] F. Guérin, F. Guinand, Towards an autonomous warehouse inventory scheme, in: 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), IEEE, 2016, pp. 1-8.
- [18] T.M. Fernández-Caramés, O. Blanco-Novoa, A UAV and blockchain-based system for inventory and traceability applications in big data-driven supply chain management, *Sensors*, 19(10) (2019) 2394.
- [19] N. Macoir, J. Bauwens, Uwb localization with battery-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Fahimi, A. Naghash, A Fast Warehouse Inventory Micro Aerial Vehicle System Equipped with Visual Guidance and Navigation Algorithm, Amirkabir J. Mech Eng., 53(12) (2022) 5785-5808.

DOI: [10.22060/mej.2021.19428.7022](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19428.7022)

