



**dr inż. Robert Suszyński**  
**prof. dr hab. inż. Krzysztof Wawryn**  
**mgr inż. Mariusz Dziębowski**  
Wydział Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Koszalińska  
ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

## Algorytm efektywnego wyznaczania pozycji obiektów astronomicznych na zdjęciach głębokiego kosmosu

**Słowa kluczowe:** turbulencje atmosfery, filtracja zakłóceń obrazu kosmosu, szum Gaussa

### **STRESZCZENIE**

W artykule przedstawiono algorytm cyfrowego przetwarzania zdjęć obiektów astronomicznych w celu efektywnego wyznaczania pozycji tych obiektów. Zaproponowana metoda została zoptymalizowana z uwagi na jej skuteczność w kompensowaniu szumu i zniekształceń powodowanych turbulencją atmosfery oraz niedoskonałościami prowadzenia teleskopu podczas długoczasowej fotografii obiektów kosmicznych z powierzchni Ziemi. Rozwiązanie to jest przygotowane do implementacji w systemie automatycznego identyfikowania gwiazd na zarejestrowanych obrazach, dedykowanego do kalibracji systemów GoTo, wbudowanych w mechanizmy napędowe teleskopów. Metoda została zweryfikowana symulacyjnie w środowisku MATLAB, na rzeczywistych obrazach obiektów astronomicznych.

### **1. WPROWADZENIE**

Obrazy astronomiczne otrzymane za pomocą teleskopu są obarczone licznymi zniekształceniami. Wprowadzają je przede wszystkim: turbulencje atmosfery, szумы własne układów rejestrujących oraz niedoskonałości układu optycznego i napędów. Uzyskiwanie rzeczywistego obrazu jest zadaniem optyki adaptatywnej (AO). Zajmuje się ona filtracją zakłóceń otrzymanego obrazu, wyznaczeniem pozycji obiektów głębokiego nieba (gwiazd) oraz generacją sygnału korygującego układ optyczny lub ruch teleskopu śledzącego ich położenie [1, 2]. Wyznaczanie pozycji gwiazd nazywane detekcją pozycji (centroid detection) wymaga określenia punktu odniesienia tj. elementu stałego (gwiazdy) na fotografii względem, której ustalane będzie położenie całego obrazu, a więc i położenie pozostałych gwiazd [3]. Detekcja położenia gwiazd wymaga obliczenia ich środków ciężkości po usunięciu zniekształceń obrazu. W tym celu stosowane są różne techniki obliczeniowe. Najprostsza polega na wyznaczeniu środków ciężkości gwiazd [4] i jej pochodne takie jak ważone środki ciężkości, iteracyjnie ważone środki ciężkości, iteracyjnie ważone centrowanie [5-7]. Wykorzystywane jest także Gaussowskie dopasowanie wzorców [8]. Wymienione metody są również poprzedzane obliczeniami prognozującymi turbulencje atmosferyczne (oscylacje temperatury i wpływ wiatru) za pomocą wielomianów Zernike [9] bądź analizy głównych składowych (Principal Component Analysis) z filtracją Kalmana [10]. Są to bardzo

czasochłonne obliczenia, szczególnie gdy rząd wielomianów aproksymujących jest duży. Do przewidywania turbulencji wykorzystywana jest także Bayesowska teoria estymacji [11].

Proponowana w pracy metoda wyznaczania pozycji gwiazd wykorzystuje metody filtracji pozwalające w zadowalającym stopniu skompensować wpływ zniekształceń obrazu spowodowanych wymienionymi wcześniej czynnikami, a jednocześnie dostarcza wyniki obliczeń w czasie umożliwiającym skorygowanie ruchu teleskopu. Została ona przedstawiona w pracy wg następującego schematu. W rozdziale 2 omówiono wpływ turbulencji atmosfery, szumów własnych układu i niedoskonałości układu optycznego i mechanicznego na jakość obrazów otrzymanych za pomocą teleskopu, a także dokonano symulacji wpływu atmosfery na rejestrowane obrazy. Algorytm filtracji szumów w rejestrowanych obrazach wraz z wyznaczeniem pozycji obiektów astronomicznych został opisany w rozdziale 3. Wyniki działania algorytmu zostały w rozdziale 4 zilustrowane zdjęciami przed i po rekonstrukcji oraz zweryfikowane na podstawie porównania z wynikami otrzymanymi metodami klasycznymi. Rozdział 5 zawiera wnioski.

## **2. SYMULACJA WPLYWU TURBULENCJI ATMOSFERY NA JAKOŚĆ REJESTROWANYCH OBRAZÓW OBIEKTÓW ASTRONOMICZNYCH**

### **2.1. Zniekształcenia obrazu podczas fotografii długoczasowej z powierzchni Ziemi**

Pozyskiwane obrazy astronomiczne wymagają długich czasów naświetleń, ze względu na niewielką ilość światła docierającego do obserwatora (przetwornika CCD). Wymaga to utrzymania nieporuszonego obrazu docierającego do CCD, w czasie od kilku do kilkudziesięciu minut. Jest zagadnienie skomplikowane ze względu na ruch pozorny sfery niebieskiej związany z ruchem obrotowym Ziemi. W celu utrzymania nieporuszonego obrazu stosuje się odpowiednie montaż układow optycznych (teleskopów) podążające za sferą niebieską, adekwatnie do pozycji geograficznej miejsca obserwacji oraz pozycji obserwowanego obiektu na niebie. Niezależnie od właściwego montażu teleskopu, obrazy astronomiczne są zniekształcane przez turbulencje atmosfery, szumy własne rejestratorów i niedokładności fotografowania.

Turbulencje atmosfery stanowią główne źródło zniekształceń obrazu. Zniekształcenia te są spowodowane soczewkami optycznymi powstającymi w atmosferze, różnicami gęstości i temperatury powietrza na różnych wysokościach, przemieszczaniem się mas atmosfery, zanieczyszczeniami powietrza pyłami i gazami. Do tych zniekształceń można zaliczyć także zniekształcenia wywołane źródłami światła powstającymi w najbliższym otoczeniu tj. oświetleniem miejskim, ulic, reklam, rozbłyskami i refleksami światła.

Szumy własne układów rejestrujących posiadają charakter statystyczny opisany rozkładem Poissona. Stosunek sygnału do szumu wzrasta gdy do matrycy dociera więcej fotonów. Ciemniejsze fragmenty obrazu są silniej zaszumione niż jasne. W celu zwiększenia ilości światła docierającego do matrycy stosuje się długie okresy naświetlania.

Niedokładności fotografowania są spowodowane drganiami mechanicznymi: układu napędu montażu teleskopu i otoczenia przenoszącymi się na układ napędowy oraz optyczny teleskopu, a także czynnikami zewnętrznymi wpływającymi na układ napęd-teleskop-kamera\_CCD, takimi jak: podmuchy wiatru, szybkie wahania temperatury, zmiany temperatury, opady atmosferyczne. Częściowym rozwiązaniem tych problemów jest budowa stanowisk obserwacyjnych [12] wyposażonych w dokładniejsze montaż teleskopów oraz izolujących teleskopy od wpływu otoczenia.

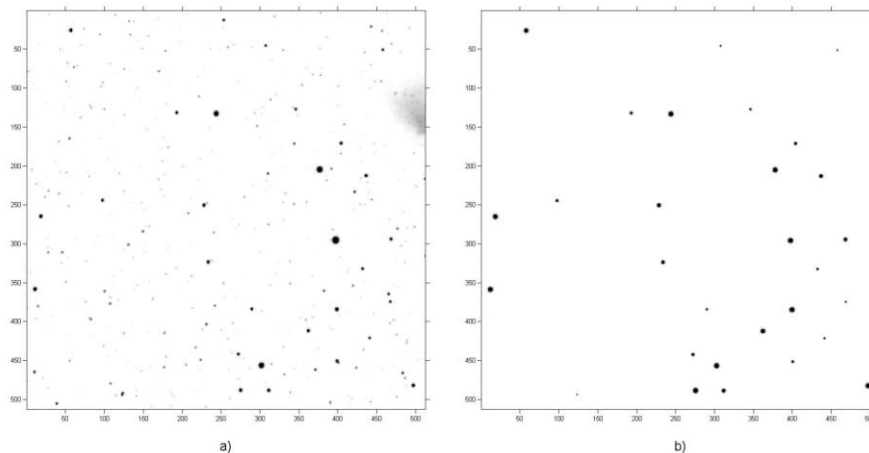
Niezwykle trudnym zadaniem jest zmniejszenie wpływu zjawisk atmosferycznych na jakość otrzymywanych zdjęć. W dalszych rozważaniach przedstawiona zostanie metoda kompensacji zniekształceń pochodzących od turbulencji atmosfery.

## 2.2. Symulacja działania atmosfery Ziemi na rejestrowany obraz gwiazd

W warunkach idealnych gwiazdy powinny być rejestrowane na obrazie w postaci pojedynczych pikseli o wartościach odpowiadających ich jasności względnej. M.in. z powodu turbulencji atmosfery takie idealne warunki nie istnieją, a gwiazdy rejestrowane są w postaci rozmytych punktów. W opisie tego rozmycia stosowana jest odpowiednia funkcja opisująca rozchodzenie się światła (PSF - Point Spread Function). W znakomitej większości przypadków stosowana jest funkcja o rozkładzie Gaussa wyrażona zależnością [13,14]:

$$\mu(x, y) = \frac{1}{2\pi\delta} \exp \left[ -\frac{(x - X)^2 + (y - Y)^2}{2\delta^2} \right]$$

gdzie  $\delta$  jest odchyleniem standardowym, natomiast  $X$  i  $Y$  określają punkt środkowy, dla którego występuje najwyższa wartość.



Rys. 1. Gwiazdy Drogi Mlecznej a) zarejestrowany obraz rzeczywisty, b) obraz utworzony analitycznie na podstawie pozycji gwiazd i ich jasności względnej. Fotografia własna.

W takim opisie nie uwzględniany jest przypadek gdy główny promień światła pochodzący od gwiazd pada na inny punkt niż środek piksela matrycy CCD. Z tego powodu metodę usprawniono i przedstawia się ona następująco:

- w pliku graficznym - pixmapie pikseli o zerowych wartościach umieszcza się pojedyncze piksele o wartości odpowiadającej jasności i położeniu symulowanych gwiazd,
- dla każdego piksela reprezentującego gwiazdę tworzona jest Gaussowska funkcja PSF opisująca rozkład padającego światła, przy czym odchylenie standardowe przyjmuje wartość zależną od wartości piksela czyli jasności gwiazdy, później wartości tej funkcji nadawane są pikselom otaczającym piksel reprezentujący gwiazdę,
- następnie zmniejsza się  $n \times n$  rozdzielczość pixmapy, poprzez nałożenie siatki składającej się z ramek o wymiarach  $n \times n$  pikseli, w każdej takiej ramce sumowane są wartości pikseli, suma ta po znormalizowaniu stanowi wartość nowotworzonego piksela,
- wartości nowej siatki pikseli są wymnażane przez wartość piksela odpowiadającego parametrom gwiazdy, tworząc symulację obrazu rozmytego powstającego w warunkach rzeczywistych.

Na rysunku 1 przedstawiono zarejestrowany obraz rzeczywisty oraz wynik symulacji dla gwiazd o znanym położeniu i jasności względnej. Na rysunku 1b pominięto ciemniejsze gwiazdy jako nieistotne dla kolejnych etapów badań. Otrzymane symulowane obrazy gwiazd odpowiadają swoim pierwowzorom na obrazie rzeczywistym pod względem jasności, powierzchni i kształtu. Tak otrzymany obraz testowy oraz obrazy rzeczywiste były wykorzystane w dalszej części pracy do sprawdzenia algorytmu wyznaczania pozycji gwiazd.

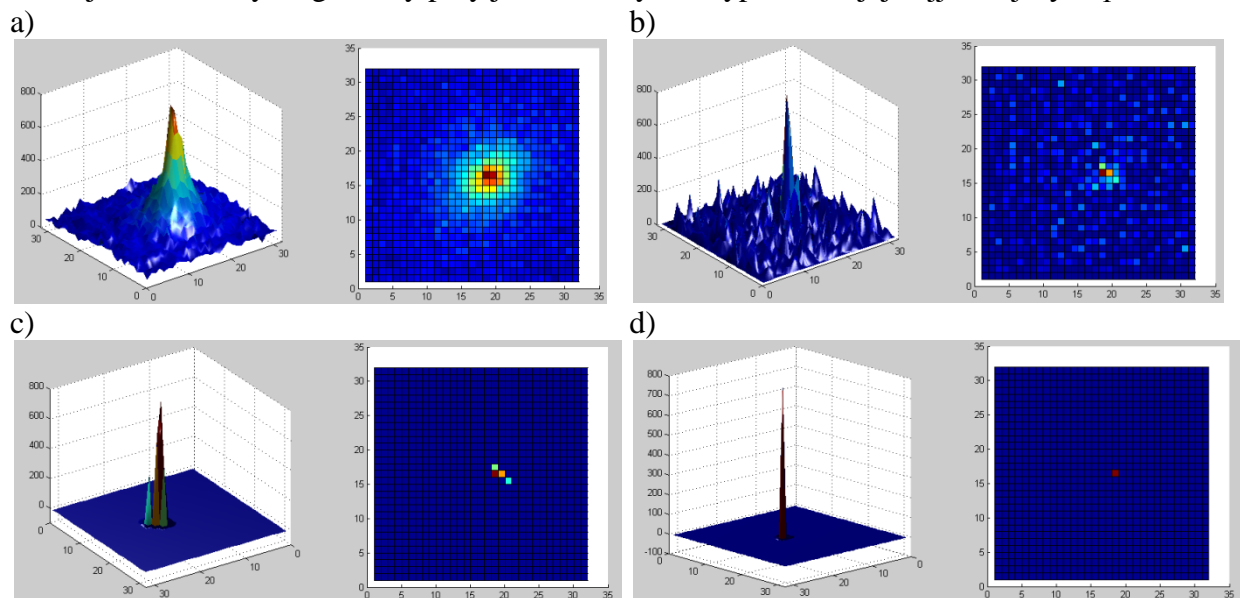
### 3. OPTIMALIZACJA WYZNACZANIA POZYCJI GWIAZD

#### 3.1. Filtracja korygująca zarejestrowany obraz

Pierwszym etapem cyfrowego przetworzenia zarejestrowanych obrazów jest zastosowanie szybkiej filtracji opartej na wykorzystaniu maski laplasjanu 3x3:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Operacja ta nie jest pracochłonna numerycznie z uwagi na niewielki rozmiar zastosowanej maski, a jednocześnie daje poprawę parametrów przetwarzanego obrazu. Filtracja ta pozwala na uwypuklenie centralnych części pozycjonowanych obiektów, przez co zwiększa się ufność i sprawność obliczeniową wyliczenia centroid w następnych krokach. Szum i zakłócenia zostają stłumione co pozwala na ich łatwiejsze usunięcie. Kolejne etapy przetwarzania rzeczywistego obrazu gwiazdy sfotografowanej kamerą SBIG 2000XM oraz teleskopem SkyWatcher 80D przedstawiono na rysunku 1. Obraz średniej jasności gwiazdy uzyskano poprzez wyodrębnienie ramki 32x32 piksele z 5 minutowej ekspozycji Drogi Mlecznej w gwiazdozbiorze Łabędzia. Rysunek 2a pokazuje obraz gwiazdy przez filtracją. Uwidocznione jest rozmycie jej światła wokół najjaśniejszych centralnych pikseli o powierzchni 10x11 pikseli. Tak duża powierzchnia zarejestrowanego obiektu nie pozwala na jednoznaczne wyznaczenie jego pozycji bez dalszej obróbki sygnału. Na kolejnym rysunku 1b pokazano efekt filtracji. Wyraźnie można zaobserwować zmniejszenie i wyrównanie poziomu tła, zmniejszenie rozmycia gwiazdy przy jednoczesnym uwypukleniu jej najjaśniejszych pikseli.



Rys. 2. Kolejne etapy wyznaczania pozycji gwiazdy, a) rzeczywisty obraz zarejestrowany, b) obraz po filtracji z wykorzystaniem laplasjanu, c) segmentacja progowa, d) wyznaczony centroid. Fotografia własna.

#### 3.2. Wyodrębnienie sygnałów użytecznych z szumu tła i zakłóceń

W drugim etapie cyfrowego przetwarzania obrazu obiektów astronomicznych należy usunąć ze zdjęcia szum związany z tłem. Najprostszym sposobem osiągnięcia tego celu jest posłużenie się metodą segmentacji progowej ze współczynnikiem progu dobranym w zależności do rodzaju fotografowanych obiektów i jakości zdjęcia. Dobre rezultaty osiągnąć się dla progu z zakresu 0,30 - 0,50 maksymalnej zarejestrowanej wartości.

Metoda ta ma zasadniczą wadę. Podczas segmentacji progowej bezpowrotnie utracona zostaje informacja o słabszych zarejestrowanych sygnałach, czyli ciemniejszych obiektach

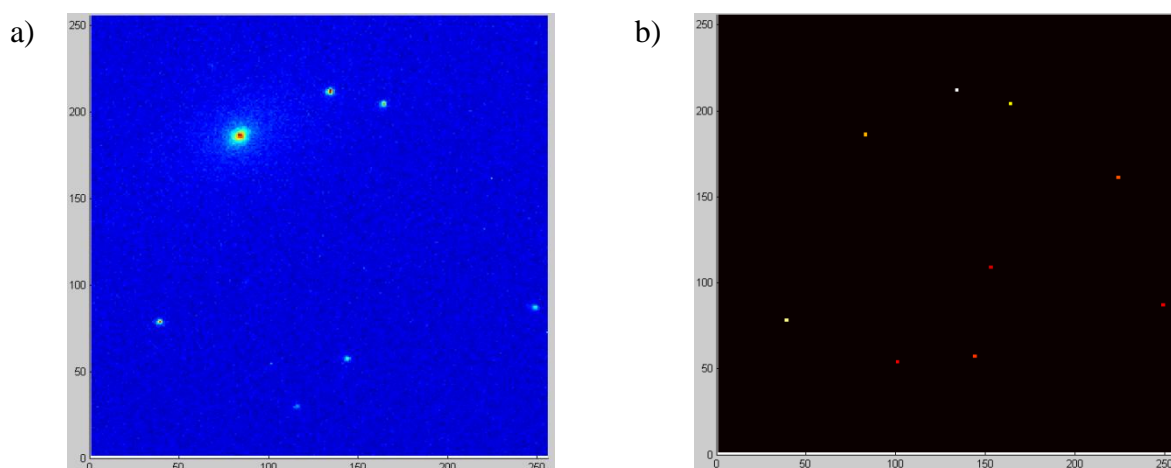
astronomicznych, utrwalonych w obrazach na poziomie szumu tła. Zmniejszenie wartości progu pozwala na wyodrębnienie większej liczby obiektów (również tych ciemniejszych), ale wprowadza niebezpieczeństwo zinterpretowania sygnału zakłócającego (np. pochodzącego od hot pikseli) jako kolejnych obiektów. Ponieważ zamierzeniem przedstawianego algorytmu przetwarzania zdjęć jest dokładne pozycjonowanie jedynie najjaśniejszych zarejestrowanych obiektów, wada ta w tym przypadku nie ma istotnego znaczenia.

### 3.3. Wyznaczenie pozycji obiektów - obliczenie centroidy

Ostatnim, trzecim etapem obliczeń dla wyodrębnionych obiektów, jest wyznaczenie ich współrzędnych na zarejestrowanym obrazie. Proces ten jest realizowany poprzez wyznaczenie środka geometrycznego, z uwzględnieniem jasności poszczególnych pikseli danego obiektu. Na rysunku 1c uwidoczniono efekt segmentacji z progiem 0,3. Do dalszej analizy pozostała niewielka grupa jasnych pikseli. Wybrano metodę badania otoczenia niezerowych pikseli jako optymalną w proponowanym algorytmie. Polega ona na wzmocnieniu najjaśniejszego piksela w grupie i wygaszeniu pozostałych. Na rysunku 1d przedstawiono końcowy wynik obliczenia centroidy gwiazdy. Jest to pojedynczy niezerowy piksel, wyznaczający położenie gwiazdy z dokładnością równą rozdzielczości wykorzystanego rejestratora.

## 4. WERYFIKACJA ALGORYTMU DLA OBRAZU TESTOWEGO ORAZ RZECZYWISTYCH OBRAZÓW GWIAZD

Przedstawiony algorytm został zaimplementowany numerycznie w środowisku MATLAB. Jako obrazy wejściowe zostały wykorzystane rzeczywiste długoczasowe zdjęcia obiektów astronomicznych. Zostały one zarejestrowane teleskopem SkyWatcher z kamerą SBIG 2000XM na montażu paralaktycznym Sky-Watcher EQ6 PRO SynScan. Dla porównania te same metody zostały zastosowane do obrazów testowych, otrzymanych metodą symulacji wpływu atmosfery, opisaną w rozdziale 2. Na rysunku 3a przedstawiono badany fragment (256x256 pikseli) oryginalnego zdjęcia obiektów w otoczeniu gwiazdy Deneb, w gwiazdozbiorze Łabędzia, przed procesem cyfrowego przetworzenia. Te same gwiazdy po filtracji, segmentacji i obliczeniu centroid uwidocznione są na rysunku 3b.



Rys. 3. Grupa gwiazd w gwiazdozbiorze Łabędzia a) zarejestrowany obraz rzeczywisty, b) efekt końcowy wyznaczenia centroid gwiazd. Fotografia własna.

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie ilustrujące złożoność obliczeniową proponowanej metody z odniesieniem do metod klasycznych [1,3,15] opisanych w literaturze. Dla wszystkich rozpatrywanych metod obliczenia zostały przeprowadzone dla obrazu rzeczywistego na rysunku 3a oraz wygenerowanego obrazu testowego. Porównując otrzymane rezultaty można

zauważyć, iż omawiany algorytm upraszcza i przyspiesza obliczenia dając zadowalające wyniki oraz dokładność wyznaczenia pozycji fotografowanych obiektów. Przybliżony czas obliczeń oraz liczbę operacji matematycznych niezbędnych do wykonania dla każdej metody otrzymano opracowując odpowiednie algorytmy w środowisku Matlab i przeprowadzając obliczenia za pomocą stacji roboczej z dwoma procesorami Xeon X5460@3.16GHz.

Tab. 1. Zestawienie złożoności obliczeniowej proponowanej metody oraz metod klasycznych

	Proponowany algorytm	Współ. korelacji wzajem.	Metoda FFT
Liczba sumowań	2 297 284	78 848 000	2 241 300
Liczba mnożeń	129 032	26 215 200	14 293 665
Przybliżony czas obliczeń	0,3171 s	1,8085 s	0,7932 s

## 5. WNIOSKI

W pracy zaprezentowano efektywny algorytm wyznaczenia pozycji obiektów astronomicznych w sekwencji długoczasowych fotografii obiektów DSO. Algorytm został zoptymalizowany z uwagi na zastosowanie w układach śledzenia gwiazd pracujących w czasie rzeczywistym. Opracowanie wydajnych numerycznie metod filtracji, segmentacji i identyfikacji pozwala na precyzyjne obliczenie pozycji badanych obiektów i zastosowanie metody w układach rzeczywistych wykorzystujących DSP lub FPGA.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Suszyński, Convolution Method for CCD Images Processing, in Proc. of the IEEE 52<sup>nd</sup> Int. Midwest Symposium on Circuits and Systems, Cancun, Mexico, 2009, p. 4.
- [2] R. Suszyński, K. Wawryn, R. Wirski, 2D Image Processing for DSO Astrophotography, in the Proc. of the Int. Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering, Tokyo, Japan, 2010, p. 5.
- [3] R. Suszyński, M. Dziębowski, „Wyznaczanie pozycji obiektu prowadzącego w systemach rejestrujących obrazy DSO“, *Wiadomości Elektrotechniczne*, pp. 43-46, 10/2012.
- [4] P. C. McGuire, D. G. Sandler, M. L. Hart, and T. A. Rhoadarmer, „Adaptive optics: neural networks wavefront sensing, reconstruction, and prediction, scientific applications of neural nets“, in the Proceedings of the 194th W. E. Heracus Seminar, 1998. J. W. Clark, T. Lindenau, M.L. Ristig, Springer Verlag Publishers, pp. 97, (1999).
- [5] S. Thomas, T. Fusco, A. Tokovinin, M. Nicolle, V. Michau, and G. Rousset, „Comparison of centroid computation algorithms in a Shack-Hartmann sensor“, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 371, pp. 323-336, (2006).
- [6] K. L. Baker and M. M. Moalem, „Iteratively weighted centroid of Shack-Hartmann wave-front sensors“, *Opt. Express* 15, pp. 5147-5159, (2007).
- [7] L. A. Poyneer, D. W. Palmer, K. N. LaFortune, and B. Bauman, „Experimental results for correlation-based wave-front sensing“, *SPIE* 5894, 58940N, (2005).
- [8] A. Vyas, M. B. Roopashree, and B. R. Prasad, „Centroid detection by Gaussian pattern matching in adaptive optics“, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 1, No. 26, pp. 30-36, (2010).
- [9] R. J. Noll, „Zernike polynomials and atmosphere turbulences“, *JOSA* Vol. 66 No. 3, pp. 207-211, (1976).
- [10] A. Berghi, A. Canedese, and A. Masiero, „Atmospheric turbulence prediction: a pca approach“, in Proc. of the IEEE 46<sup>th</sup> Conference on Decision and Control, pp. 572-577, (2007).
- [11] B. D. Jeffs and J. C. Christou, „Blind bayesian restoration of adaptive optics telescope images using generalized gaussian markov random field models“, in the Proc. of the SPIE, Vol. 3353: Conference on Adaptive Optics and Telescope Systems, (1998).
- [12] R. Suszyński, Stand-alone station for deep space objects astrophotography, in Proc. of the IEEE 52<sup>nd</sup> Int. Midwest Symposium on Circuits and Systems, Cancun, Mexico, 2009, p. 4.
- [13] Wei Zhang, Zhiguo Jiang, Haopeng Zhang, Jianwei Luo, Optical Image Simulation System for Space Surveillance, in Proc. of the IEEE 26<sup>th</sup> Int. Parallel and Distributed Processing Symposium, 2012.
- [14] C. Li, Y. Zhang, C. Zheng, X. Hu, Implementing High-performance Intensity Model with Blur Effect on GPUs for Large-scale Star Image Simulation, in Proc. of the Int. Conference on Image and Graphics, 2013.
- [15] The Implement of High Speed Correlation Tracking Algorithm Based on FPGA in Space Solar Telescope, Chang-song Li, Sheng-zhen Jin, in Proc. of 8<sup>th</sup> International Conference on Signal Processing 2006.

**dr inż. Robert Suszyński**  
**prof. dr hab. inż. Krzysztof Wawryn**  
**mgr inż. Mariusz Dziębowski**  
Wydział Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Koszalińska  
ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

## An Efficient Algorithm for Determining Positions of Astronomical Objects in the Deep Space Object Pictures

**Keys:** effect of atmospheric turbulence, filtering of DSO images, Gaussian noise

### ABSTRACT

The article presents an algorithm for digital image processing of astronomical objects in order to effectively determining the position of these objects. The proposed method has been optimized due on its effectiveness of removing noise and distortion caused by atmospheric turbulence and imperfections in long exposure photography of astronomical objects. This solution is ready for implementation in a system for automatically identifying stars in the recorded images. Such system is designed for GoTo circuits at telescope's drives. The method was verified by simulation in MATLAB program on real images of astronomical objects..

- Fig 1. The stars of the Milky Way, a) the real recorded image, b) image created analytically based on the positions of stars and their relative brightness.
- Fig 2. The steps of determining the position of the stars, a) the real recorded image, b) image after filtering using the Laplacian, c) segmentation threshold, d) the designated centroid.
- Fig 3. Group of stars in the Cygnus a) the real recorded image, b) the end result of the stars' centroids calculation.