

Mgr inż. Paweł Dobrzyński
Mgr inż. Arkadiusz Zgoła
Wojskowa Akademia Techniczna

Optymalne procedury przeszukiwania przestrzeni i lokalizacji obiektów

W artykule podjęto próbę przedstawienia zagadnienia przeszukiwania przestrzeni w jak najkrótszym czasie przy czym poszukiwany obiekt powinien być wykrywany z największym prawdopodobieństwem. Zaprezentowano również rozwiązanie układowe podjętego problemu w oparciu o układ optyczny (CCD) sterowany przez system mikroprocesorowy.

Optimal space searching and objects location procedures

In the paper the problem of space searching and objects location procedures at the shortest time have been presented. Detected target should be find with maximum probability. The system can be used for automatic infrared objects interception.

1. ZAGADNIENIE PRZESZUKIWANIA

Podczas przeszukiwania obszarów przestrzeni pojawia się szereg zadań, które należy rozwiązać praktycznie. Do zadań tych należy: wybór optymalnej trajektorii przeszukiwania, wybór optymalnych rozmiarów i kształtu analizowanego obszaru, prędkości skanowania itp., ogólnie rzecz biorąc zadanie optymalnego rozkładu parametrów w przeszukiwanym obszarze. W zależności od postawionego zadania przeszukiwania, rozkład statystyczny obszaru i jego kryterium określa optymalne rozwiązanie doboru wartości parametrów. Kryteria opierają się na minimalizacji czasu wykrycia obiektu, minimalizacji energii zużytej na przeszukiwanie pola i maksymalizacji prawdopodobieństwa wykrycia obiektu, przy nałożeniu ograniczeń na rozmiary, masę i inne parametry systemu realizującego przeszukiwanie. W wielu wypadkach przeszukiwanie zachodzi w warunkach zakłóceń (np. cieplnych), sygnał od których jest porównywany z roboczymi sygnałami, co może prowadzić do błędnych rozwiązań. Dla każdego typu pola z określonymi parametrami i charakterystykami istnieją optymalne trajektorie przeszukiwania z punktu widzenia otrzymania największej ilości informacji o jego stanie. Charakterystyki częstotliwościowe pozwalają określić maksymalny i minimalny rozrzut czasu, w przedziale którego skanowany obszar, przemieszcza się po zadanej części trajektorii. Natomiast charakterystyki czasowe charakteryzują sumaryczny czas znajdowania się skanującego pola na danym punkcie pola lecz nie określają danych o innych parametrach np. o prędkości ruchu przeszukiwanego pola. W czasie Δt pole może znajdować się na skanowanym punkcie jeden raz, „przecinając” go z małą prędkością lub wiele razy „przecinając” punkt z dużymi prędkościami, w obydwóch przypadkach informacja docierająca do detektora będzie inna.

Obydwie charakterystyki są ze sobą związane, przy czym charakterystyki czasowe charakteryzują dokładnie informacyjne właściwości trajektorii skanowania. Przy przeszukiwaniu przestrzeni systemami optycznymi problem optymalizacji przedstawia się następująco. Mamy dziedzinę X możliwych położeń poszukiwanego obiektu. Procesowi przeszukiwania w tej dziedzinie towarzyszą straty występujące podczas przeszukiwania pola Φ . Rozkład strat w przeszukiwanej przestrzeni jest opisany funkcją $\varphi(x)$, natomiast efektywność rozkładu parametrów przeszukiwanego pola wyrażony jest funkcją $Q[x, \varphi(x)]$. W celu otrzymania funkcji $\varphi(x)$, należy znać informację a priori o przypuszczalnym położeniu poszukiwanego obiektu. Informacja ta jest rozkładem prawdopodobieństwa gęstości $p(x)$ pojawienia się obiektu w różnych punktach danej dziedziny X . Określenie optymalnych procedur przeszukiwania możemy przeprowadzać korzystając z jednego lub dwóch wzajemnie ze sobą związanych kryteriów. W pierwszym kryterium podano sumaryczne straty przeszukiwanego pola Φ . Ich rozkład jest taki, aby prawdopodobieństwo wykrycia poszukiwanego obiektu było największe, tzn. należy znaleźć wartość funkcji $\varphi(x)$, maksymalizującej wartość funkcjonału:

$$R = \int_x p(x)Q[x, \varphi(x)]dx \quad \text{przy warunku} \quad \int_x \varphi(x)dx \leq \Phi. \quad (1)$$

W drugim kryterium parametry pola powinny mieć rozkład taki, aby sumaryczna ich wartość $\Phi = \int_x \varphi(x)dx$ była minimalna i spełniała warunek:

$$\int_x p(x)Q[x, \varphi(x)]dx \geq R. \quad (2)$$

Liczba informacji o możliwym położeniu poszukiwanego obiektu wskazuje na to, że rozkład strat podczas przeszukiwania pola może być nierównomierny:

$$\varphi(x) \neq \text{const} \quad \text{przy} \quad x \in X, \quad (3)$$

gdzie: X - zbiór możliwych położeń poszukiwanego obiektu.

Znając rozkład gęstości prawdopodobieństwa pojawienia się poszukiwanego obiektu $p(x)$ w różnych punktach przestrzeni, możemy przyjąć że funkcja $p(x)$ i jej pierwsza pochodna względem x są ciągłe. Dziedzinę X możemy przedstawić jako uporządkowany zbiór o postaci $X = \{x^0 \leq x \leq x^1\}$ gdzie:

x^0 - współrzędna komórki od której zaczyna się proces przeszukiwania,

x^1 - współrzędna komórki na której kończy się proces przeszukiwania.

Dla funkcji $p(x)$ powinien być spełniony warunek:

$$\int_{x^0}^{x^1} p(x)dx = 1 \quad (4)$$

Obiekt zostanie wykryty przy $\mu=1$ i $\varphi(x) \rightarrow \infty$, oraz może być nie wykryty jeśli $\mu < 1$ i $\varphi(x) \rightarrow \infty$. Prawdopodobieństwo wykrycia obiektu przez elementarnej części pola wyliczana jest z wyrażenia:

$$dR = p(x)dxQ[\varphi(x)]. \quad (5)$$

Należy znaleźć taką funkcję $\varphi(x)$, aby średnia wartość prawdopodobieństwa wykrycia obiektu przy przeszukiwaniu całej przestrzeni była największa to znaczy aby funkcjonał:

$$R = \int_{x^0}^{x^1} p(x)Q[\varphi(x)]dx, \quad (6)$$

przyjął maksymalną wartość. Sumaryczna wartość strat poniesiona w procesie przeszukiwania, jest przedstawiona w postaci zależności:

$$\varphi_z(x) = \int_{x_0}^x \varphi(x) dx. \quad (7)$$

Przy czym:

$$\varphi_z(x') \leq \Phi, \quad (8)$$

Określając φ dla dostatecznie dużej ilości x otrzymamy optymalny rozkład parametrów przeszukiwanego pola. Procedura jest prowadzona dotąd, aż równanie (8) będzie spełnione przy $\lambda = \lambda_1$, to w tych częściach pola, gdzie $\ln p(x) \leq \lambda_1$ przeszukiwanie nie jest prowadzone, a gdzie $\ln p(x) \geq \lambda_2$ poziom rozkładu parametrów przeszukiwania jest stały i wynosi $\bar{\varphi}$. Jeżeli $\lambda = \lambda_1$, to przeszukiwanie jest prowadzone w całej zadanej przestrzeni, a minimalny poziom rozkładu parametrów przeszukiwania wynosi φ^* , a w częściach gdzie $\ln g(x) \geq \lambda^*$ poziom wynosi $\bar{\varphi}$. Jeśli z postaci funkcji $p(x)$ i liczby parametrów przeszukiwania można wywnioskować gdzie przeszukiwanie jest niecelowe, to można zapisać:

$$\ln \lambda_1 \approx \frac{\ln \partial Q[\varphi(x)]}{\partial \varphi|_{\varphi=0}} + \ln p_1, \quad (10)$$

gdzie: p_1 - rozkład prawdopodobieństwa pojawienia się poszukiwanego obiektu na granicy dwóch części przeszukiwanego pola.

Z drugiej strony, jeżeli istnieją części pola gdzie $p(x) \geq p_2$, gdzie prawdopodobnie będzie osiągnięte nasycenie poziomu parametrów przeszukiwania, to:

$$\ln \lambda_2 \approx \frac{\ln \partial Q[\varphi(x)]}{\partial \varphi|_{\varphi=\bar{\varphi}}} + \ln p_2. \quad (11)$$

2. METODYKA DOBORU OPTIMALNEJ TRAJEKTORII PRZESZUKIWANIA

Osobnym problemem podczas przeszukiwania przestrzeni jest dobór minimum czasowego zapewniającego jak najszybsze wykrycie obiektu z maksymalnym prawdopodobieństwem. Rozpatrzmy przypadek kiedy przeszukiwane pole jest podzielone na szereg stref, w których jest zadane prawdopodobieństwo znalezienia się obiektu $0 < p_i < 1$ ($\sum p_i = 1$) w każdej strefie i przedział czasu t_i , w czasie którego przeszukiwana jest dana strefa, przy czym zakładamy że obiekt jest nieruchomy w czasie okresu przeszukiwania. Każda strefa jest przeszukiwana ze stałą częstotliwością f_i . Należy określić częstotliwość skanowania stref, przy których straty czasu do momentu wykrycia obiektu będą najmniejsze, przy dowolnej kolejności skanowania stref. Warunek strat czasu dla pojedynczej strefy wyraża się zależnością (11),

$$A_i(f_i) = P_i t_i + P_i Q_i \left(\frac{1}{f_i} + t_i \right) + P_i Q_i^2 \left(\frac{2}{f_i} + t_i \right) + \dots + P_i Q_i^m \left(\frac{m}{f_i} + t_i \right) + \dots = A_i \quad (11)$$

gdzie:

- P_i - prawdopodobieństwo wykrycia obiektu w czasie okresu przeszukiwania;
- Q_i - prawdopodobieństwo niewykrycia; $Q_i = 1 - P_i$ ($0 < P_i < 1$);
- f_i - częstotliwość przeszukiwania danej strefy;

t_i - czas, w czasie którego odbywa się przeszukiwanie danej strefy.

Pierwszy człon równania (11) określa straty czasu podczas przeszukiwania w czasie pierwszego cyklu przeglądania pierwszej strefy. Drugi człon równania określa straty czasu podczas drugiego cyklu przeszukiwania tej strefy. Rozwiązanie powyższe funkcji

$$A(f_1, f_2, f_3, \dots, f_n) = \sum_{i=1}^{i=n} p_i \left(t_i + \frac{1 - p_i}{f_i p_i} \right) \text{ w punktach } (f_1^0, f_2^0, f_3^0, \dots, f_{0n}) \text{ przyjmuje minimum}$$

strat czasu do wykrycia poszukiwanego obiektu w całym polu. Z rozwiązania równania podobnego do powyższego, obliczmy wartości f_i , które odpowiadają minimum strat czasu podczas wykrywania.

Pełny algorytm określania optymalnych procedur jest następujący:

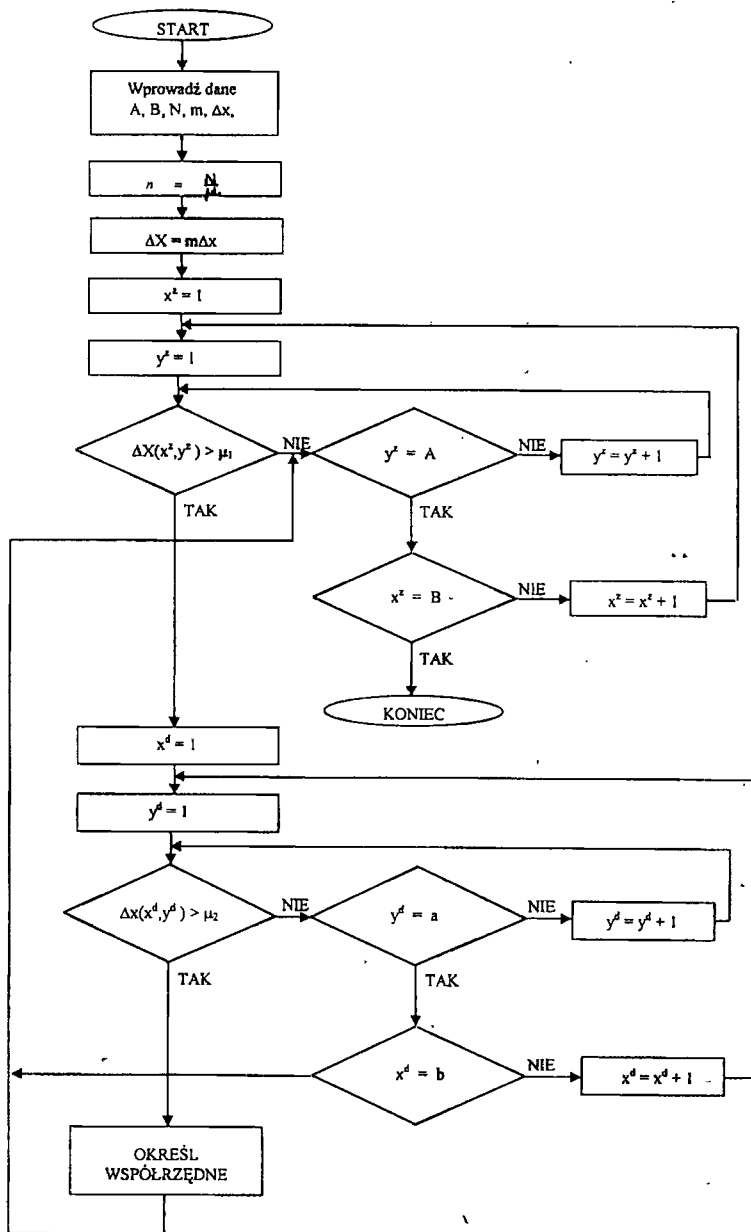
1. Na podstawie dynamicznych właściwości pola przeszukiwania wybieramy okres pełnego przeszukiwania pola.
2. Biorąc pod uwagę maksymalną dopuszczalną prędkość przeszukiwania rozpatrujemy szereg trajektorii, spośród których będziemy określać optymalną.
3. Grupę trajektorii dobieramy w oparciu ich charakterystyki $\Delta t(\rho)$ i przebiegu charakterystyki $\ln P(\rho)$ przeszukiwanego pola.
4. Dla wybranej grupy trajektorii i przyjętych T i V_{max} , określamy dokładną geometrię każdej trajektorii i średnicę pola przeszukiwania.
5. Dla każdego typu trajektorii znajdujemy wartość strat przeszukiwania i określamy optymalny rozkład strat wzdłuż promienia przeszukiwanego pola.
6. Dla wyboru optymalnej trajektorii skanowania obliczamy wartość współczynnika A od którego zależy kształt trajektorii.

Algorytmy takie powinny zapewniać przeszukiwanie przestrzeni, wykrycie obiektu, określenie jego współrzędnych, oraz taką zmianę procedur przeszukiwania aby śledzenie tego obiektu było możliwe z dużą dokładnością. Zakładamy że przeszukiwane pole składa się z N elementarnych obszarów, a rozkład prawdopodobieństwa pojawienia się celu w każdej z nich jest jednakowy. Zadanie przeszukiwania sprowadza się do określenia minimum czasu w który będzie wykryty obiekt. W pierwszym etapie całe pole przeszukiwania $X_1 = X$ jest przeszukiwane równomiernie ale poziom sygnału przeszukiwania, przychodzący do jednego elementu odbiorczego jest za mały do wykrycia obiektu z zadaniem prawdopodobieństwem, ale pozwala uzyskać informację o obecności lub nieobecności obiektu w obszarze danego elementu. Z wyników równomiernego przeszukiwania dobieramy te elementy, sygnał z których przewyższa zadany próg. Te elementy stanowią zawartość zbioru X_2 . W następnym etapie przeszukiwany jest tylko obszar pola obejmowany przez elementy ze zbioru X_2 i spośród nich wybierane są te elementy sygnał z których przewyższa zadany drugi próg i itd. Podczas wieloetapowego przeszukiwania, po kolejnym przeszukaniu i zapamiętaniu wszystkich części pola, dalszy proces przeszukiwania jest zorganizowany jako przeszukiwanie „zgrubne” i „dokładne”. Na rys.2. i 3. Przedstawiono optymalne algorytmy przeszukiwania.

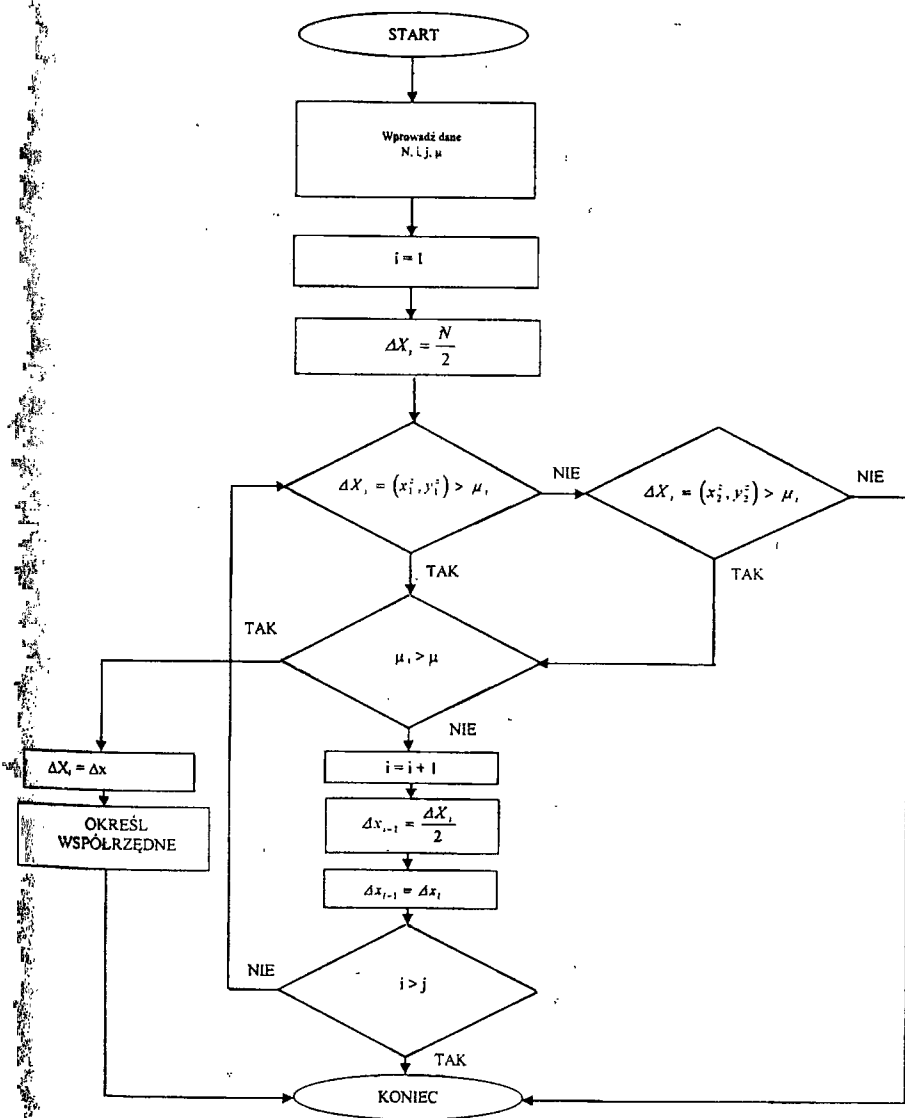
3. REALIZACJA UKŁADOWA

Układ przeszukujący (rys.3) na podczerwień jest zamocowany w przegubie Kardana dla wyszukiwania i rozpoznawania obiektów pod kątem ataku od $0^\circ \div 15^\circ$ lub większym. Układ pracuje w podstawowym zakresie widma podczerwieni dla detekcji "gorącego

punktu". Głowica optyczna określa pozycję i zmianę ruchu obiektu oraz odróżnia obiekt ma na tle zakłóceń biernych. Głowica wykorzystuje procesor wideo jako źródło danych do nakierowania obiektu w środek strefy lub w wyselekcjonowany punkt traktowany jako strefa.



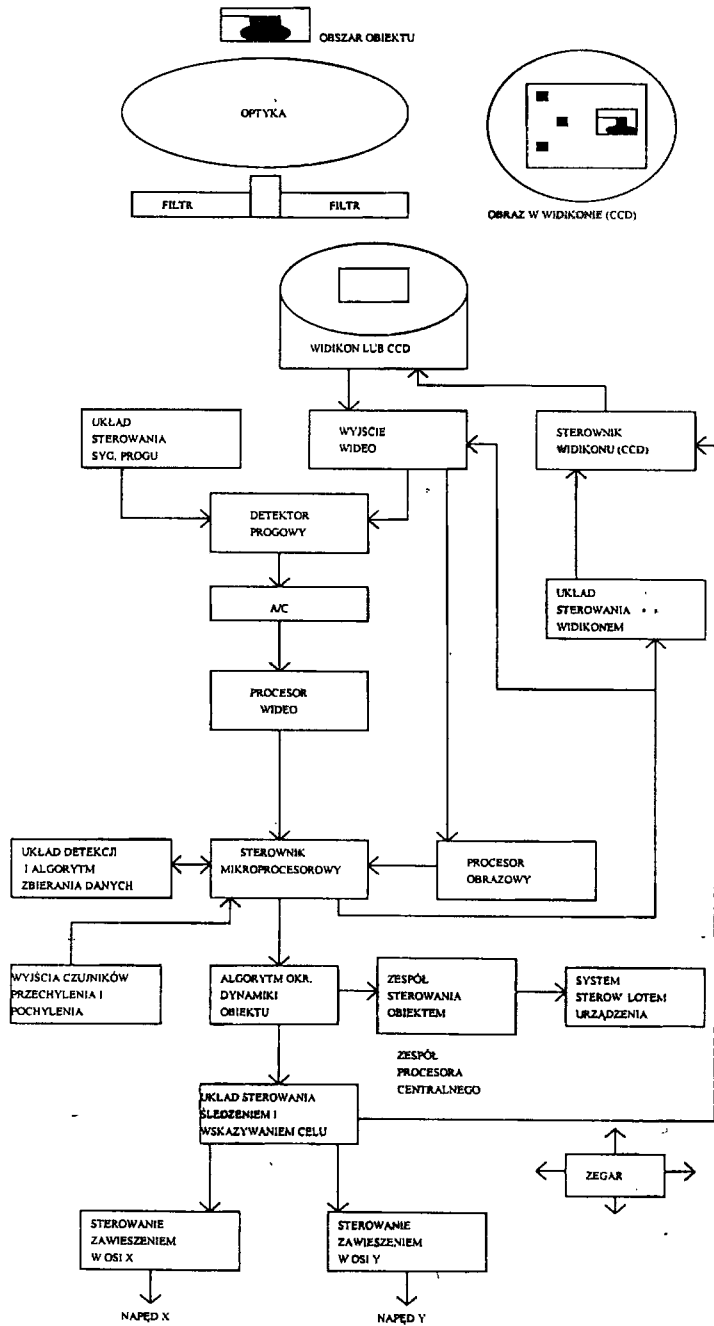
Rys. 1. Algorytm jednoetapowego przeszukiwania przestrzeni



Rys.2. Algorytm wieloetapowego przeszukiwania przestrzeni.

Zespół procesora centralnego (CPU) zawiera układ mikroprocesorowy z algorytmami identyfikującymi obiekt w/g określonych z góry kryteriów w podstawowym rozmiarze, temperaturę oraz multispektralne charakterystyki. Układ zawiera tor sterowania śledzeniem i wskazywaniem obiektu oraz określa pole widzenia z wewnętrzną lokacją wyselekcjonowanego obiektu. W układzie zobrazowania (CCD) z szerokim polem widzenia określone jest dokładne położenie obiektu a wartość danej przesyłana jest do zespołu realizującego algorytm sterowania. Detektor progowy sprzężony jest z matrycą CCD poprzez wyjście wideo. Detektor progowy wypracowuje wartość progową która jest porównywana z wartością sygnału z wyjścia wideo. Gdy sygnał z wyjścia przewyższa

wartość progu, to obszar w polu widzenia układu optycznego jest traktowany jako możliwy obiekt. W konwerterze A/C następuje zamiana danych z detektora na postać cyfrową.



Rys. 3. Schemat blokowy urządzenia realizującego przeszukiwanie.

Blok sterowania skanowaniem współpracuje ze sterownikiem mikroprocesorowym i sterownikiem matrycy CCD. Sterownik skanera rozciąga obszar potencjalnego obiektu oraz skanuje obraz z widikonu i określa dane o tym obiekcie w/g wcześniej określonych kryteriów. Dane z powiększonego obszaru skanowania (po przejściu do przeszukiwania dokładnego) są przesyłane do wyjścia wideo i skąd trafiają do procesora wizyjnego.

4. LITERATURA.

- [1.] G.P. Katys. „Awtomaticzeskij kontrol niestacionarnych parametrov i parametriczeskich poliej. Izdatielstwo Akademii Nauk CCCP. Moskwa 1962r.
- [2.] G.P. Katys. „wosprijatie i analiz opticzeskoj informaczi awtomaticzeskoj sistiemoj”. Izdatielstwo „Maszynostrojenie” Moskwa 1986r.
- [3.] G.P. Katys, V.M. Illinsky, I.K. Melnichienko, S.Ye. Zdor. „On design and control of automatic units for exploration of planet surface”. Proc. 3 IFAC Symposium „Automatic Control in Space”. Tuluza 1970r.
- [4.] E.C. Posner. „Optimal search procedures”. IEEE Trans. on Inform. Theory, 1963r., v.9, N 3.
- [5.] V. Pursiheimo. „On the search for a target whose motion is conditionally deterministic with stohastic initial conditions on location and parameter”. Journ. Apply. Math., 1977r., v.32, N. 1, pp. 105-115.