
Katedra Automatyki, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Katedra Astronomii, Wydział Matematyczno-Fizyczno-Techniczny
Wyższa Szkoła Pedagogiczna im. Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie

mgr inż. Krzysztof Wójcik

**Algorytmy przetwarzania obrazów
przeznaczone do sterowania teleskopem
astronomicznym**

ROZPRAWA DOKTORSKA

promotor:

prof. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz

Kraków 1994

Spis treści.

1. Wstęp.

2. System prowadzenia teleskopu.

- 2.1. Wymagania stawiane systemowi prowadzenia teleskopu.
 - 2.1.1. Kryteria dokładności i szybkości przenoszenia zadanych wartości położenia teleskopu na jego rzeczywiste położenie.
 - 2.1.1.1. Dokładność statyczna regulacji.
 - 2.1.1.2. Dokładność dynamiczna.
 - 2.1.2. Wrażliwość na zakłócenia.
 - 2.1.3. Kryteria niezawodności pracy układu regulacji.
- 2.2. Własności teleskopu jako obiektu regulacji.
- 2.3. Ustalenie algorytmu działania i parametrów regulatora położenia teleskopu.
 - 2.3.1. Regulator proporcjonalny.
 - 2.3.1.1. Badanie stabilności układu z regulatorem proporcjonalnym.
 - 2.3.1.2. Badanie jakości regulacji regulatora proporcjonalnego.
 - 2.3.1.3. Wyznaczenie parametrów regulatora proporcjonalnego.
 - 2.3.2. Regulator nieliniowy.
 - 2.3.2.1. Badanie stabilności układu z regulatorem nieliniowym.
 - 2.3.2.2. Badanie jakości regulacji regulatora nieliniowego.
 - 2.3.2.3. Wyznaczenie parametrów regulatora nieliniowego.

3. Wizyjny system sterowania położeniem teleskopu.

- 3.1. Rozpoznawanie obrazów.
- 3.2. Wprowadzenie do problemu sterowania teleskopem z pomocą systemu wizyjnego.
 - 3.2.1. Wstępne przetwarzanie obrazów.
 - 3.2.2. Opis regulatora współdziałającego z systemem wizyjnym.
 - 3.2.3. Analiza jakości regulacji.
 - 3.2.3.1. Dokładność statyczna, dynamiczna oraz wrażliwość na zakłócenia.
 - 3.2.3.2. Niezawodność pracy układu regulacji.

4. Regulacja położenia teleskopu jako regulacja obrazu.

- 4.1. Model regulatora obrazu w systemie prowadzenia teleskopu.
- 4.2. Wybór wektora cech opisujących obraz oraz funkcji odległości między obrazami.
 - 4.2.1. Przetwarzanie obrazów jako proces wieloetapowy.
 - 4.2.2. Dyskusja sposobu wydzielenia zadań etapowych oraz definiowania obiektów etapowych i ich wektorów.
 - 4.2.2.1. Procesy pierwszego etapu.
 - 4.2.2.2. Procesy drugiego etapu.
 - 4.2.2.2.a. Dyskusja definicji obiektu drugiego etapu.
 - 4.2.2.2.b. Dyskusja sposobu definiowania wektora cech obiektu drugiego etapu.
 - 4.2.2.3. Procesy trzeciego etapu.
 - 4.2.2.3.a. Definicja obiektu trzeciego etapu.

- 4.2.2.3.b. Poszukiwanie najbardziej istotnych składowych wektora cech obrazu.
- 4.2.3. Wprowadzenie miary porównującej obrazy.
- 4.2.3.1. Wprowadzenie miary porównującej obrazy w przestrzeni O_2 .
- 4.2.3.2. Wprowadzenie ogólnej miary porównującej obrazy.
- 4.3. Ustalenie algorytmu działania układu prowadzenia teleskopu.
- 4.3.1. Definicja klasy K_1 , oraz algorytmu sterowania z nią związanego.
- 4.3.1.1. Definicja klasy K_1 .
- 4.3.1.2. Algorytm sterowania związany z klasą K_1 .
- 4.3.2. Definicja klasy K_2 , oraz algorytmu sterowania z nią związanego.
- 4.3.2.1. Definicja klasy K_2 .
- 4.3.2.2. Algorytm sterowania związany z klasą K_2 .
- 4.3.3. Definicja klasy K_3 , oraz algorytmu sterowania z nią związanego.
- 4.4. Ocena jakości regulatora
- 4.5. Opis algorytmów regulacji realizujących konkretne zadania systemu prowadzenia teleskopu.
- 4.5.1. Przemieszczenie teleskopu w dowolny fragment nieba (zadanie Z.21).
- 4.5.2. Kompensacja ruchu dobowego Ziemi (zadanie Z.22).
- 4.5.3. Stabilizacja położenia teleskopu oraz korekcja niedokładności działania układu kompensacji ruchu dobowego Ziemi (zadanie Z.31).
- 4.5.4. Śledzenie ruchomych obiektów (zadanie Z.32).
- 4.5.5. Zmiana położenia teleskopu względem sfery niebieskiej według zadanej trajektorii (zadanie Z.33).
- 4.6. Realizacja numeryczna algorytmów wizyjnego systemu prowadzenia teleskopu.
- 4.6.1. Obliczanie wartości funkcji podobieństwa p_1 .
- 4.6.2. Obliczanie wartości funkcji g (miary zgodności obrazu z obrazem wzorcowym).

5. Implementacja systemu prowadzenia teleskopu.

- 5.1. Realizacja sprzętowa elementów systemu prowadzenia teleskopu.
- 5.1.1. Układ wprowadzający obraz nieba do pamięci komputera
- 5.1.2. Mikrokomputer.
- 5.1.3. Elementy wykonawcze
- 5.2. Implementacja algorytmów prowadzenia teleskopu.
- 5.2.1. Podstawowe oprogramowanie przetwarzania obrazów.
- 5.2.1.1. Określenie poziomu tła obrazu.
- 5.2.1.2. Określenie zbiorów pikseli tworzących obiekty.
- 5.2.1.3. Obliczenie współrzędnych środka obiektu.
- 5.2.1.4. Impulsowe sterowanie silnikami teleskopu.
- 5.2.2. Procedury realizujące konkretne zadania związane ze sterowaniem ruchem teleskopu.
- 5.2.2.1. Tworzenie wzorców obrazu nieba.
- 5.2.2.2. Ustalanie elementów macierzy U , transformacji układów współrzędnych.
- 5.2.2.3. Ustalanie dodatkowego, pomocniczego zestawu wzorców obrazu nieba.
- 5.2.2.4. Zmiana położenia teleskopu według zadanej trajektorii.
- 5.2.2.5. Podążanie teleskopu za ruchomymi obiektami.
- 5.2.3. Oprogramowanie zarządzające.
- 5.2.4. Oprogramowanie realizujące zadane komunikacji systemu prowadzenia z obserwatorem.

5.2.4.1. Obsługa menu.

5.2.4.2. Edycja wartości parametrów określających działanie procedur sterowania teleskopem.

5.2.4.3. Monitorowanie procesów przetwarzania obrazów.

6. Prezentacja efektów pracy systemu prowadzenia.

7. Podsumowanie.

Dodatek 1.

Dodatek 2.

Dodatek 3.

Dodatek 4.

Literatura.

Informacja edytorska do wersji pracy z 2009 roku

Dokument w formacie PDF powstał w roku 2009 z plików źródłowych utworzonych w 1993 i 1994 roku. Niestety po 16 latach autor, nie dysponując starymi wersjami programu CorelDRAW; musiał umieścić wersje zeskanowane niektórych rysunków. Brak możliwości dotarcia do oryginalnych, barwnych fotografii analogowych sprawił, że zostały one po prostu pominięte. W stosunku do oryginalnej pracy występują zmiany w dodatku 1 (który w ostatniej chwili przed złożeniem pracy został skrócony), w numeracji stron, wzorów z dodatku 1 oraz w spisie treści.

1. Wstęp

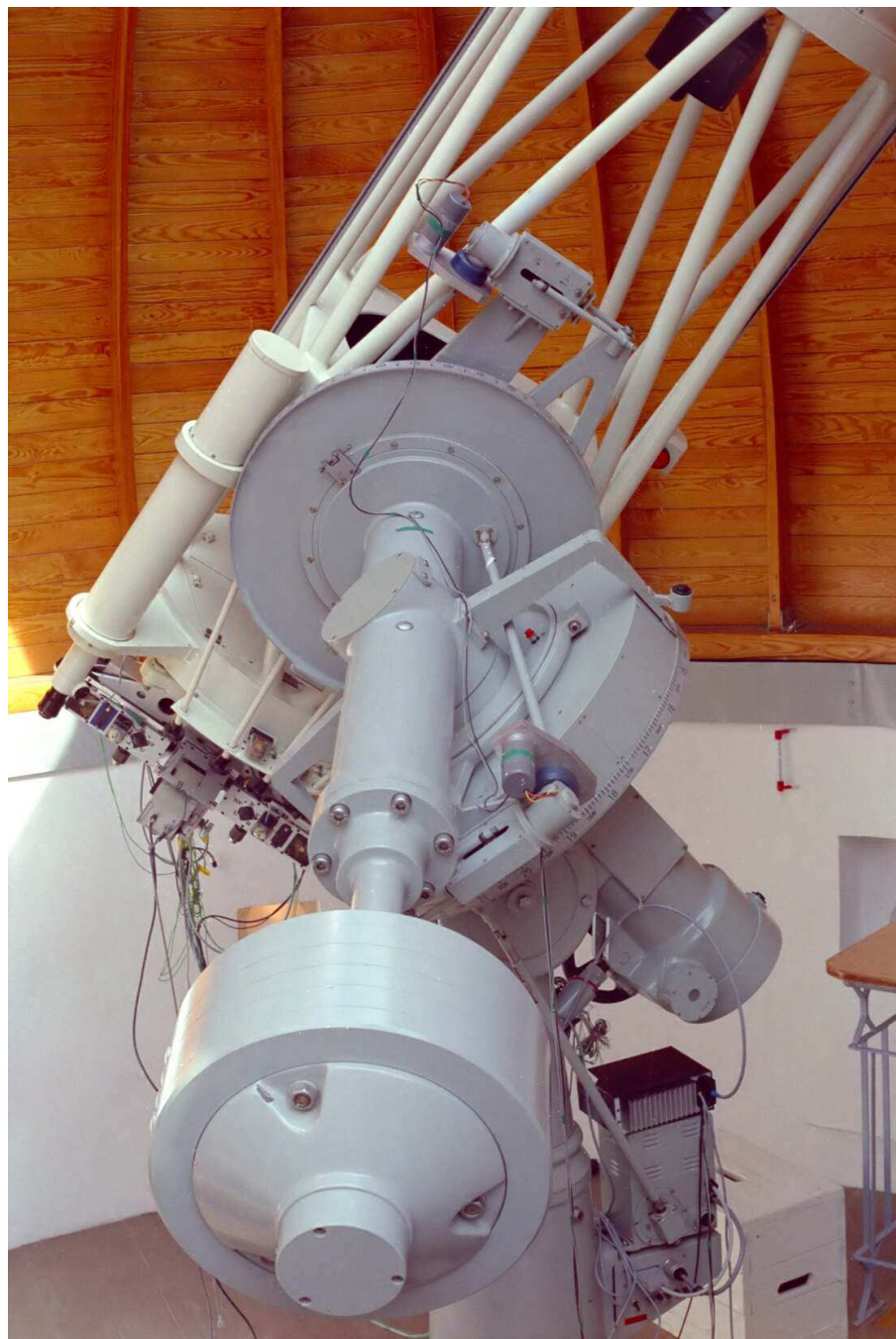
Pomimo rosnącego znaczenia radioastronomii i metod wykorzystujących promieniowanie X oraz γ , wydaje się, że pozycja metod optycznych w astronomii obserwacyjnej pozostaje dominująca. Dzięki metodom obserwacyjnym wykorzystującym promieniowanie widzialne, podczerwone oraz ultrafioletowe, możliwe jest bowiem dokładne określenie kierunku oraz natężenia promieniowania docierającego od obserwowanych obiektów. Znaczenie tych metod powiększa też fakt, iż promieniowanie widzialne oraz część promieniowania podczerwonego są przepuszczane przez atmosferę ziemską tylko z niewielkimi stratami (tzw. okno optyczne [22]). Niestety, atmosfera ziemska nie tylko tłumi promieniowanie elektromagnetyczne, ale poprzez swoje fluktuacje zmienia jego kierunek. Jest to zasadnicza przyczyna ograniczenia jakości obserwacji prowadzonych poprzez ziemskie teleskopy optyczne.

Pracujące teleskopy o średnicach zwierciadła większych od pięciu metrów ogromnie zwiększają natężenie dochodzącego do detektorów promieniowania, lecz ich zdolność rozdzielcza jest niewiele większa od rozdzielczości teleskopów budowanych przed blisko stu laty. Na przykład uruchomiony w 1910 roku dwumetrowy teleskop zwierciadlany w obserwatorium na Mt Wilson jakością otrzymywanych obrazów dorównuje współczesnym gigantom. W sytuacji, w której żaden cudowny układ optyczny nie powoduje istotnego polepszenia jakości obserwacji, zaczęto zabiegać o nią w inny sposób.

Wszędzie gdzie jest to możliwe próbuje się usprawnić, choćby nieznacznie, działanie instrumentów obserwacyjnych, zoptymalizować i zautomatyzować obserwację, wreszcie zminimalizować wpływy zakłóceń atmosfery. Teleskopy wyposażane są w układy optyki adaptacyjnej (kompensujące zmiany czoła fali świetlnej wywołane fluktuacjami atmosfery), układy korygujące grawitacyjne i termiczne odkształcenia zwierciadła, oraz wyposażane są w komputerowe systemy sterowania ruchem. Zastosowanie tych układów stało się możliwe wraz z ogromnym rozwojem elektroniki, a zwłaszcza mikroelektroniki. W większości opierają się one bowiem na komputerowych systemach sterowania; są zatem tzw. systemami czasu rzeczywistego. Systemy te wymagają od sprzętu komputerowego znacznych mocy obliczeniowych, toteż do niedawna mogły być uruchamiane wyłącznie na dużych komputerach. Nie mogły być więc instalowane w warunkach typowego obserwatorium, położonego z reguły w odludnej i trudno dostępnej okolicy, głównie na szczytach gór. Sytuacja ta zmieniła się w chwili upowszechnienia się szybkich i niewielkich rozmiarami stacji roboczych, oraz mikrokomputerów.

Do opisanej grupy systemów poprawiających jakość obserwacji teleskopowych należy także przedstawiony w niniejszej pracy system sterowania ruchem teleskopu.

Jego powstanie wiązało się z nagłą potrzebą udoskonalenia systemu sterowania ruchem teleskopu zainstalowanego w górskim obserwatorium astronomicznego na Suhorze (Gorce) - fotografia 1.1. Jest to jeden z kilku pracujących w Polsce teleskopów firmy Carl Zeiss (dawniej NRD), wyposażonych oryginalnie w niedokładny, elektryczno-mechaniczny układ sterowania. Część optyczna tych teleskopów jest natomiast wysokiej klasy.



Fotografia 1.1 Obserwatorium astronomiczne na Suhorze.

Umożliwia to instalowanie na nich nowoczesnej aparatury obserwacyjnej. Efektywne jej użycie uzależnione jest jednak w głównej mierze od jakości pracy systemu sterowania ruchem teleskopu.

Podstawowym założeniem towarzyszącym tworzeniu systemu jest więc jego wysoka jakość działania. Ponadto, jego budowa powinna wiązać się z możliwie małymi zmianami w konstrukcji zamocowania teleskopu (umożliwiającymi pracę dotychczasowego systemu sterowania) i relatywnie niskimi kosztami. Pracujący system powinien cechować się dużą odpornością na zakłócenia, możliwością działania w różnorodnych warunkach obserwacyjnych, a także łatwą obsługą i konserwacją. Niestety, przy powyższych założeniach, budowa systemu staje się problemem niełatwym do rozwiązania. Wymagana precyzja działania wymusza konieczność zastosowania optycznych czujników położenia gwiazd w stosunku do teleskopu. Jedno z rozwiązań, opisane w [8], polega na zastosowaniu detektorów położenia centrycznego obiektu (gwiazdy) na obrazie, działających w zamkniętym układzie regulacji. Rozwiązanie to, doskonalone poprzez zastosowania militarne (systemy naprowadzania rakiet) umożliwia uzyskanie odpowiedniej dokładności i prędkości sterowania, lecz staje się bezużyteczne w przypadku dużego nagromadzenia gwiazd na obserwowanym wycinku nieba. Nie zapewnia zatem poprawnego działania systemu w dość powszechnie występujących warunkach obserwacyjnych. W sytuacjach o których mowa, wykorzystuje się w dalszym ciągu zmysł wzroku obserwatora i jego umiejętności percepcji obrazu [9]. Zaangażowanie człowieka w proces sterowania wiąże się oczywiście z możliwością utraty ciągłości sterowania, zmęczeniem obserwatora zmniejszającym jakość i niezawodność sterowania oraz z często niewystarczającą odpornością układu na zakłócenia spowodowaną długim czasem reakcji człowieka.

Rozwiązanie zaproponowane przez autora polega na wykorzystaniu komputerowego systemu analizy obrazów

Możliwość jego efektywnej pracy można wyrazić w formie następującej tezy:

Dzięki użyciu odpowiednich algorytmów przetwarzania obrazów jest możliwe skuteczne, polepszające jakość obserwacji i zmniejszające zaangażowanie człowieka, wykorzystanie komputerowego systemu wizyjnego w systemie sterującym ruchem teleskopu.

Celem prezentowanej pracy jest udowodnienie powyższej tezy.

Wykonanie powyższego zadania wiąże się koniecznością rozwiązania szerokiego zakresu problemów. Szczególnie dokładnie przedstawione są w pracy następujące zagadnienia:

- opis systemu w kategoriach teorii systemów regulacji automatycznej z podaniem konkretnego, odpowiedniego do zastosowania algorytmu regulacji (rozdział 2),

- zaproponowanie oraz dyskusja metod analizy obrazów, możliwych do zastosowania w systemie (rozdziały 3,4)
- podanie efektywnych, numerycznych algorytmów przetwarzania informacji, odpowiadających wprowadzonym metodom (rozdział 4)
- implementacja systemu sterowania ruchem teleskopu (rozdział 5).
praktyczne sprawdzenie jakości i przydatności uruchomionego systemu (rozdział 6).

Zagadnienia poruszone w dwu ostatnich punktach dotyczą konkretnego, wybudowanego i uruchomionego przez autora wizyjnego systemu sterowania ruchem teleskopu w obserwatorium na Suchorze

W zakres prezentowanej pracy wchodzi ponadto prezentacja efektów pracy systemu (rozdział 6), oraz podsumowanie (rozdział 7). Jest w nim zawarta ocena stopnia zrealizowania podstawowego celu pracy, jej najważniejsze osiągnięcia oraz wnioski podsumowujące całą pracę

Autor wyraża swe gorące podziękowania promotorowi pracy prof. dr hab. inż. Ryszardowi Tadeusiewiczowi, którego uwagi merytoryczne i formalne miały ogromne znaczenie w przygotowaniu niniejszej pracy. Szczególne podziękowania składa autor również swojemu współpracownikowi oraz koledze, mgr Jerzemu Krzesińskiemu. Jako doświadczony astronom obserwator służył on fachową wiedzą oraz radami zwiększającymi użyteczność systemu, a także wniósł spory wkład pracy w jego wdrożenie

2. System prowadzenia teleskopu.

Prowadzone z pomocą teleskopu obserwacje astronomiczne wymagają, by teleskop miał możliwość skierowania się na dowolny fragment nieba. Umożliwia mu to system nazywany systemem prowadzenia teleskopu lub systemem sterowania ruchem teleskopu. Powinien on realizować następujące funkcje:

Z21. Nakierowanie teleskopu na dowolny rejon nieba.

Z22. Przemieszczanie teleskopu zapewniające kompensację ruchu dobowego Ziemi.

Z23. Zmiana ustawienia teleskopu w czasie trwania obserwacji zgodnie z założonym programem badań.

Mechaniczną część systemu nazywa się montażem teleskopu. Zapewnia on obrót osi optycznej teleskopu względem dwóch, z reguły wzajemnie prostopadłych, osi. Stosuje się najczęściej dwa typy konstrukcji montażu. W montażu azymutalnym jedna z osi jest prostopadła, druga natomiast równoległa do płaszczyzny horyzontu. Montaż paralaktyczny (równikowy) jest natomiast układem, w którym jedna z osi obrotu teleskopu (tzw. oś godzinna) jest równoległa do osi obrotu Ziemi, zaś druga oś (deklinacyjna) jest do niej prostopadła [22]. Montaż teleskopu zaopatrzony w elementy napędowe zapewnia realizację pierwszej funkcji (Z21) systemu prowadzenia - dowolnego nakierowania teleskopu. Jako elementy napędowe wykorzystuje się najczęściej silniki elektryczne, bądź, zwłaszcza w małych teleskopach, korzysta się z układów napędzanych ręcznie.

Spełnieniem drugiej funkcji (Z22) - kompensacją ruchu dobowego Ziemi, zajmuje się przeważnie pewien podsystem systemu prowadzenia. Z reguły jest nim otwarty układ sterowania zmieniający w funkcji czasu położenie teleskopu. W montażu azymutalnym podążanie teleskopu za obracającą się sferą niebieską wymaga zmiany jego położenia w obu osiach, podczas gdy w zawieszeniu paralaktycznym - tylko w osi godzinnej. W montażu paralaktycznym wystarcza zatem jeden mechanizm zegarowy sprzężony z osią godzinną. Trzecia funkcja (Z23) - zmiana ustawienia teleskopu w czasie trwania obserwacji - systemu prowadzenia sprowadza się do realizacji przez układ kilku dodatkowych zadań:

Z31. Stabilizacja położenia teleskopu oraz korekcja niedokładności działania układu kompensacji ruchu dobowego Ziemi.

Z32. Śledzenie ruchomych obiektów.

Z33. Zmiana położenia teleskopu względem sfery niebieskiej według zadanej trajektorii.

Zmiany położenia teleskopu względem nieba, przeprowadzane w czasie obserwacji dotyczą tylko niewielkiego jego wycinka. W zadaniu Z31 zmiany te nie przekraczają zwykle 1' (minuty kątowej), zaś przy realizacji zadań Z32 i Z33 sięgają one wartości

co najwyżej kilkakrotnie większej od kąta widzenia przyrządu obserwacyjnego (np. fotometr-30" (sekund kątowych), kamera CCD-5'). Z powyższych względów części wykonawcze układów realizujących zadania Z31-Z33 noszą **nazwę układów ruchów drobnych**. Przeważnie realizują one obroty teleskopu względem tych samych osi, w których działają elementy montażu teleskopu.

Przedstawione uwagi doprowadzają do następujących wniosków:

- automatyczny system prowadzenia (poza poprzedzającym obserwację "zgrubnym" nakierowaniem teleskopu) może używać jako części wykonawczej układu ruchów drobnych;
- od jakości pracy podsystemu sterującego tymi układami zależy jakość całego systemu prowadzenia;
- różnorodność zadań stawianych systemowi prowadzenia stwarza konieczność wyodrębnienia w nim odpowiedniego układu sterującego częściami wykonawczymi.

Ponadto, wymagana precyzja pracy systemu prowadzenia (omawiana w podrozdziale 2.1) wymusza istnienie układu do pomiaru aktualnego położenia teleskopu.

Wnioski te pozwalają na opisanie struktury systemu prowadzenia teleskopu w kategoriach teorii systemów regulacji automatycznej. Ogólną postać tej struktury ilustruje schemat blokowy zamieszczony na rysunku 2.1.

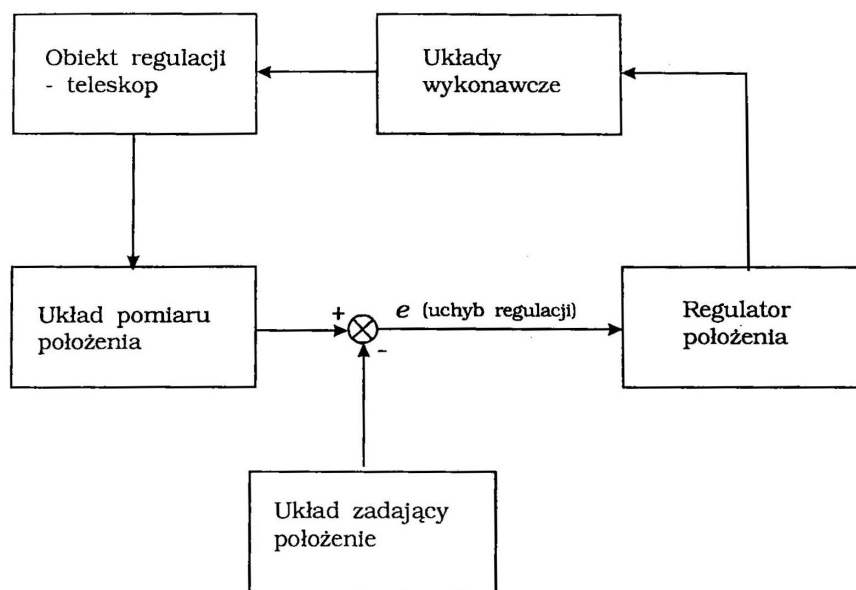
Teleskop traktowany jest tutaj jako obiekt podlegający regulacji. Oddziałuje na niego regulator - pewien układ, który korzystając z pomiaru różnicy rzeczywistego położenia teleskopu i położenia zadanego, ma za zadanie sprowadzić tę różnicę do zera. Sposób pomiaru wartości położenia teleskopu, sposób działania regulatora oraz warunki jakie jego działanie musi spełniać, należą do problemów syntezy układu regulacji.

Rozwiązanie zadania syntezy jest funkcją własności obiektu regulacji, możliwości pomiarowych wielkości wyjściowej (położenia teleskopu) oraz wymagań dotyczących jakości regulacji.

2.1. Wymagania stawiane systemowi prowadzenia teleskopu.

System prowadzenia teleskopu powinien spełniać pewne specyficzne, stawiane przez prowadzących obserwacje kryteria. Można je zestawić w następujące grupy:

1. Kryteria dokładności i szybkości przenoszenia zadanych wartości położenia teleskopu na jego rzeczywiste położenia.
2. Kryteria wrażliwości na zakłócenia.
3. Kryteria niezawodności pracy układu regulacji.



Rysunek 2.1
Układ regulacji położenia teleskopu.

Kryteria te będą definiowane przy założeniu spełnienia przez układ regulacji warunku

asymptotycznej stabilności [10]. (2.1)

Powyższe kryteria można wprowadzić zakładając jedynie ograniczoność zmian sygnałów wyjściowych obiektu regulacji, warunek asymptotycznej stabilności zapewnia jednak minimalizację zakłócającego wpływu sygnałów regulatora na pracujące instrumenty obserwacyjne.

2.1.1. Kryteria dokładności i szybkości przenoszenia zadanych wartości położenia teleskopu na jego rzeczywiste położenie.

2.1.1.1. Dokładność statyczna regulacji.

W obserwacjach polegających na otrzymywaniu obrazów z pomocą kamery CCD oraz technik fotograficznych wymaganie dokładności prowadzenia oznacza konieczność uzyskiwania maksymalnie ostrych, nieporuszonych obrazów. Wartość maksymalnej ostrości (nazywanej zdolnością rozdzielczą), jaką osiąga dany teleskop, jest zatem punktem wyjścia przy formułowaniu wymagań stawianych systemowi prowadzenia. Zdolność rozdzielczą określa się przez minimalną odległość kątową dwu świecących punktów (np. gwiazd), przy której obiekty te są jeszcze rozróżnialne. Zdolność rozdzielcza teleskopu ograniczona jest efektami

dyfrakcyjnymi¹ światła, błędami ogniskowania układów optycznych teleskopu, oraz wpływem fluktuacji atmosfery ziemskiej (angl. *seeing*).

Wśród trzech wymienionych czynników największe praktyczne znaczenie ma ten ostatni. W zależności od usytuowania obserwatorium i stanu atmosfery zjawisko *seeingu* powoduje nieostrość odpowiadającą rozdzielczości od 0.2 do ok. 3 sekund kątowych [9]. Niech s oznacza wypadkową rozdzielczość teleskopu, uwzględniającą zarówno rozdzielczość samego układu optycznego, jak również wpływ *seeingu*.

Wartość s jest podstawą do określenia maksymalnych **błędów prowadzenia**. Błąd ten (oznaczony na rysunku 2.1 przez e), definiuje się jako różnicę pomiędzy położeniem teleskopu, a jego położeniem zadany.

Niech e_s jest błędem prowadzenia po ustaleniu się przebiegów przejściowych [10] w układzie regulacji oraz w warunkach braku zakłóceń (e_s powszechnie nazywa się uchybem ustalonym regulacji [33][14]).

Przyjmuje się, że błąd e_s musi spełniać nierówność:

$$e_s \leq w \cdot s \quad \text{gdzie: } w \in (0,1) \quad (2.2)$$

Wielkość współczynnika w określa się w ten sposób, by wartość e_s nie wpływała na jakość obserwacji².

2.1.1.2. Dokładność dynamiczna.

W niektórych typach obserwacji (punkt 4.5.3) położenie zadawane zmienia się liniowo w funkcji czasu. Przyjmuje się, iż dla ustalonej prędkości zmiany v_n błąd regulacji e nie może być większy od pewnego e_n , to znaczy:

$$|e| < |e_n| \quad (2.3)$$

W innych, często prowadzonych obserwacjach ich plan wymaga, by zmiany położenia zadanego teleskopu były skokowe (punkt 4.x). Po zmianach tych obserwacje mogą być kontynuowane, jeśli błąd e ustawienia teleskopu nie przekracza pewnej wartości krytycznej e_k . Chcąc zatem zachować dużą ciągłość obserwacji należy zminimalizować czas regulacji, czyli czas, w którym błąd regulacji przekracza wartość krytyczną e_k (czyli $|e| > |e_k|$).

Wymaganą dokładność dynamiczną systemu prowadzenia można zatem określić poprzez ustalenie funkcji $t_r(p)$ odwzorowującej zadawane wielkości przesunięć p

¹ Rozdzielczość s_0 idealnego optycznie obiektywu jest funkcją długości fali światła λ oraz średnicy jego źrenicy wejściowej d [22]: $s_0 = 2.44 \lambda/d$ (kąt wyrażony w radianach)

² W praktyce przyjmuje się wartość $w = 0.3$.

położenia teleskopu, w maksymalne czasy regulacji. Funkcję tę najczęściej podaje się w uproszczonej formie, definiując zbiór par odpowiadających sobie przesunięć i maksymalnych czasów regulacji:

$$Z_p = \{(p_1, t_{r1}), \dots, (p_n, t_{rn})\} \quad (2.4)$$

gdzie: (p_k, t_{rk}) , - para: przesunięcie, maksymalny czas regulacji

n - ustalona ilość par.

2.1.2. Wrażliwość na zakłócenia.

Wpływ zakłóceń w systemie prowadzenia przejawia się powstaniem pewnego błędu e_z położenia. W większości prowadzonych obserwacji jest określany pewien krytyczny błąd e_{zk} , po przekroczeniu którego obserwacji nie da się prowadzić. Na przykład odpowiednio duży błąd prowadzi do wyjścia obrazu obserwowanej gwiazdy z pola widzenia fotometru, bądź do powstania poruszonych obrazów w kamerze CCD. Dane obserwacyjne zebrane w opisanych wypadkach muszą być zatem odrzucone. Podobnie jak w poprzednim punkcie (2.1.1.2), chcąc zwiększyć ciągłość obserwacji należy zminimalizować czas, w którym błąd prowadzenia e_z przekracza błąd krytyczny e_{zk} .

Zakłócenia działające w systemie prowadzenia oddziałują głównie na wielkość wyjściową obiektu regulacji, czyli położenie teleskopu. Zakłócenia te mają najczęściej charakter zbliżony do skokowych (mechaniczne luzy układu zawieszenia, podmuchy wiatru, itp.). A zatem, reakcja układu regulacji na tego typu zakłócenia jest równoważna reakcji na skokową zmianę położenia zadanego. Przedstawione uwagi doprowadzają do sformułowania kryterium wrażliwości układu na zakłócenia w postaci funkcji $t_z(e_z)$ odwzorowującej wielkości przesunięć o amplitudzie równej zakłóceniom w maksymalne czasy ich regulacji (czas, w którym błąd e_z przekracza e_{zk}). Podobnie jak w punkcie (2.1.1.2), funkcję tę można podać poprzez zbiór par:

$$Z_z = \{(p_{z1}, t_{z1}), \dots, (p_{zm}, t_{zm})\} \quad (2.5)$$

gdzie: (p_{zk}, t_{zk}) , - para wartość zakłócenia, maksymalny czas regulacji

m - ustalona ilość par.

Przy wartości $e_{zk}=e_k$ (2.11.2), zbiory Z_z oraz Z_p można zsumować definiując ogólne kryterium określające maksymalne czasy regulacji przy wymuszeniach skokowych oraz skokowych zakłóceniach:

$$Z_o = Z_p \cup Z_z \quad (2.6)$$

2.1.3. Kryteria niezawodności pracy układu regulacji.

Kryterium niezawodności pracy układu prowadzenia formułuje się następująco:

W warunkach braku zakłóceń oddziałujących na teleskop, oraz po ustaleniu się przebiegów przejściowych w układzie regulacji, musi zachodzić:

$$p_b/dt < v_{gr} \quad (2.7)$$

gdzie: p_b - prawdopodobieństwo wystąpienia błędu w prowadzeniu o wartości przekraczającej ustaloną liczbę e_b w czasie dt

Przyjmuje się, że błąd e_p jest równy maksymalnemu błędowi prowadzenia, który nie pogarsza jakości obserwacji, czyli zgodnie z (2.2) :

$$e_p = w s. \quad (2.8)$$

W tak zdefiniowanym kryterium wyraźnie odróżnia się błędy prowadzenia spowodowane stochastycznymi zakłóceniami działającymi na obiekt regulacji od błędów spowodowanych procesami stochastycznymi zachodzącymi w innych elementach zamkniętego układu regulacji. Wpływ tych pierwszych na jakość regulacji uwzględnia przedstawione już kryterium wrażliwości na zakłócenia (2.6). Procesy stochastyczne, powodujące zawodną w sensie (2.7) pracę układu prowadzenia najczęściej występują w układach pomiarowych, oraz w samym członie regulatora.

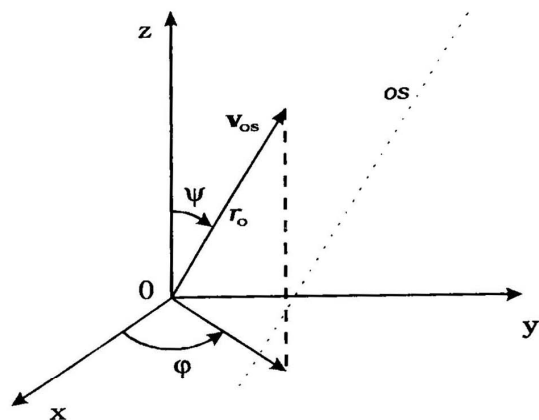
Tabela 2.1 zawiera zestawienie zdefiniowanych w podrozdziale 2.1. parametrów jakości pracy układu prowadzenia teleskopu, wraz z ich przykładowymi wartościami liczbowymi. Wartości te odpowiadają wymaganiom stawianym systemowi prowadzenia teleskopu obserwatorium na Suhorze.

dokładność statyczna przy: $s=1.8''$ $w=0.25$:	dokładność dynamiczna przy $v_n=0.4''/s$	prędkość działania i wrażliwość na zakłócenia przy $e_k=e_{zk}=0.45''$		niezawodność pracy przy $e_p=0.45''$
$e_s = 0.45''$	$:e_n=0.45''$	przesunięcie 6" 3.5" 2" 1" 0.5"	czas 4 s 2.9 s 1.3 s 1.1 s 0.9 s	$v_{gr}=2.31 \cdot 10^{-5} 1/s$

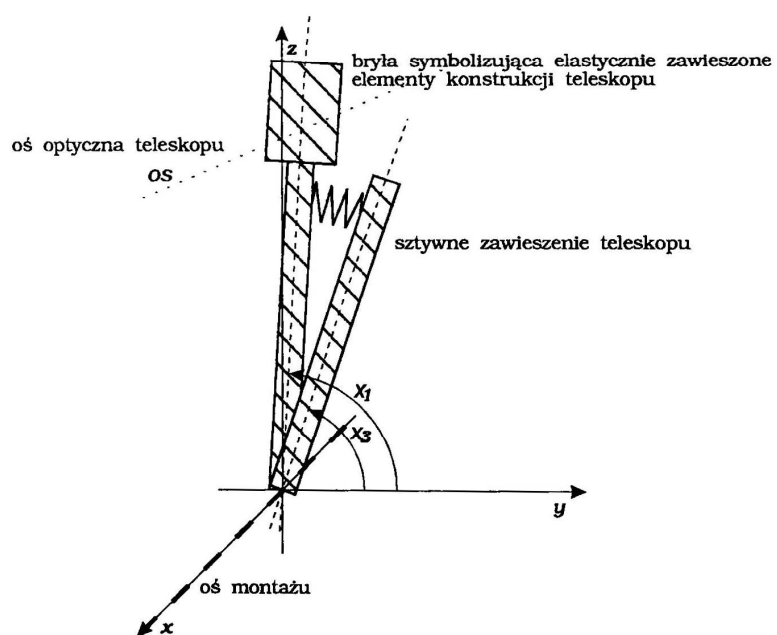
Tabela 2.1 Parametry jakości układu regulacji położenia teleskopu w obserwatorium na Suhorze..

2.2. Własności teleskopu jako obiektu regulacji.

W punkcie tym zostanie przedstawiony użyteczny model teleskopu jako obiektu podlegającego sterowaniu. Prezentowana postać modelu wymaga przyjęcia pewnych upraszczających założeń:



Rysunek 2.2
 Układ współrzędnych sferycznych, w których
 określa się położenie teleskopu.



Rysunek 2.3
 Mechaniczny model zawieszenia teleskopu.

1. Niech trójka prostych x, y, z , wzajemnie prostopadłych, mających wspólny punkt O , definiuje pewien układ współrzędnych sferycznych (rysunek 2.2) [40]. Ponadto, niech prosta z jest równoległa do jednej z osi montażu teleskopu, natomiast wektor $\mathbf{v}_{os} = (r_{os}, \varphi, \psi)$ jest równoległy do osi optycznej os teleskopu. Orientacja osi os określona jest zatem poprzez parę kątów (φ, ψ) . Kąty te można jednocześnie traktować jako kąty obrotu osi optycznej os względem dwu osi montażu teleskopu.

Współrzędne (φ, ψ) uważa się za wielkości wyjściowe obiektu regulacji.

2. Teleskop opisywany w układzie współrzędnych określonym w punkcie 1 ma własności dynamiczne jakościowo identyczne w obu współrzędnych, ponadto pomiędzy ruchami teleskopu w obu osiach nie występują interakcje. Jego model dwuwymiarowy (z dwoma wyjściami) można zastąpić modelami jednowymiarowymi.
3. W wybranej współrzędnej globalny układ mechaniczny teleskopu można zamodelować układem przedstawionym na rysunku 2.3.

Poczynione są tutaj następujące założenia:

- a) elementy konstrukcyjne bezpośrednio otaczające układ optyczny tworzą bryłę sztywną o pewnym zastępczym momencie bezwładności J ,
- b) bryła ta jest połączona poprzez elastyczną konstrukcję ze sztywnym zawieszeniem,
- c) zawieszenie jest obracane przez układy napędowe teleskopu.
- d) oddziaływanie sygnału wyjściowego regulatora na ruchome elementy zawieszenia można zamodelować układem całującym z inercją [10].

Założenia a,b,c wynikają z charakteru najczęściej spotykanych konstrukcji zawieszenia teleskopu. (rysunek 2.4 przedstawia fotografię elementów zawieszenia teleskopu w obserwatorium na Suhorze). Zgodnie z oczekiwaniami prowadzą one do modelu w postaci układu oscylacyjnego drugiego rzędu.

Założenie d związane jest z faktem, iż elementami wykonawczymi są silniki elektryczne prądu stałego. Ich stosunkowo dokładny model w postaci elementu całującego z inercją (sygnał wejściowy: napięcie, wyjściowy: kąt obrotu) uwzględnia istnienie momentu bezwładności wirnika (również przekładni), zakłada natomiast liniową zależność ustalonej prędkości obrotowej od napięcia zasilającego oraz brak indukcyjności uzwojenia wirnika [14].

Przyjęty model można opisać następującym układem równań różniczkowych:

$$\begin{cases} J \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} + r \frac{\partial x_1}{\partial t} + k_s (x_1 + x_3) = 0 \\ T_2 \frac{\partial^2 x_3}{\partial t^2} + \frac{\partial x_3}{\partial t} = K_2 u \end{cases} \quad (2.10)$$

z warunkami początkowymi :

$$\begin{aligned} x_1(0) &= x_{10}, \\ \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2}(0) &= x_{20}, \\ x_3(0) &= x_{30}, \\ \frac{\partial^2 x_3}{\partial t^2}(0) &= x_{40}; \end{aligned}$$

gdzie:

- x_1 - orientacja osi optycznej teleskopu os (zgodnie z założeniami 1,2 obecnego podrozdziału, jedna ze współrzędnych (φ, ψ) .),
- x_3 - orientacja obracającego się zawieszenia teleskopu,
- u - sygnał wejściowy układu,
- J, r, k_s - stałe mające fizyczny sens jako: moment bezwładności bryły teleskopu, współczynnik oporów ruchu, stała sprężystości konstrukcji zawieszenia.
- T_2, K_2 - stała czasowa oraz współczynnik wzmocnienia prędkościowego [10] członu całkującego z inercją (układu silnika).

Przedstawione równania opisują zachowanie się jednowymiarowych współrzędnych biegunowych x_1 i x_3 . Zgodnie z założeniem 2 przestrzenna orientacja teleskopu powinna być opisana dwoma układami równań o powyższej postaci.

Zauważając, iż pierwsze z równań 2.10 opisuje klasyczny człon oscylacyjny drugiego rzędu, układ ten można przekształcić do dogodniejszej postaci:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} = -2\xi\omega_n \frac{\partial x_1}{\partial t} - \omega_n^2 x_1 + \omega_n^2 x_3 \\ T_2 \frac{\partial^2 x_3}{\partial t^2} + \frac{\partial x_3}{\partial t} = K_2 u \end{cases} \quad (2.11)$$

Stałe J, r, k_s z układu (2.10) zostały zastąpione parametrami ω_n, ξ . Parametry te można łatwo wyznaczyć doświadczalnie (2.3.1.1).

2.3. Ustalenie algorytmu działania i parametrów regulatora położenia teleskopu.

Zgodnie z punktem 2.2 wielkością podlegającą regulacji jest orientacja osi optycznej teleskopu wyrażona przez x_1 . Poprzez zmiany x_3 (orientacja układu zawieszenia) oddziałowuje na nią sygnał sterujący u . Przedmiotem bieżącego podrozdziału będzie określenie zależności $u(e)$ określającej sposób pracy regulatora położenia teleskopu.

Rozważania prowadzone będą przy następujących założeniach:

1. Dostępna jest dokładna (wolna od zakłóceń) wartość sygnału wyjściowego obiektu regulacji.
2. Algorytm działania regulatora można opisać modelem deterministycznym [33].

Przy powyższych założeniach zostaje oczywiście spełnione kryterium niezawodności (2.7) (w całym układzie regulacji brak jest przebiegów o charakterze procesów stochastycznych).

Pierwsze z założeń jest daleko idącym uproszczeniem. To właśnie pomiar wartości sygnału wyjściowego (położenia teleskopu) jest największym problemem systemów prowadzenia. Jak zostanie pokazane (rozdział 3.x) zjawiska towarzyszące procesowi pomiaru powodują zawodności systemu prowadzenia (w sensie kryterium 2.7). W tym kontekście ewentualny wpływ algorytmu regulacji na niezawodność jest pomijalny.

Od metody działania regulatora w ogromnym stopniu zależy natomiast spełnienie pozostałych kryteriów jakości (2.1), (2.2), (2.3), (2.6),

Sposób działania regulatora ograniczony jest jednak wieloma czynnikami technicznymi, a nawet ekonomicznymi. Ograniczenia te można określić następująco:

1. Stosunkowo długi czas pomiaru wielkości wyjściowej obiektu.

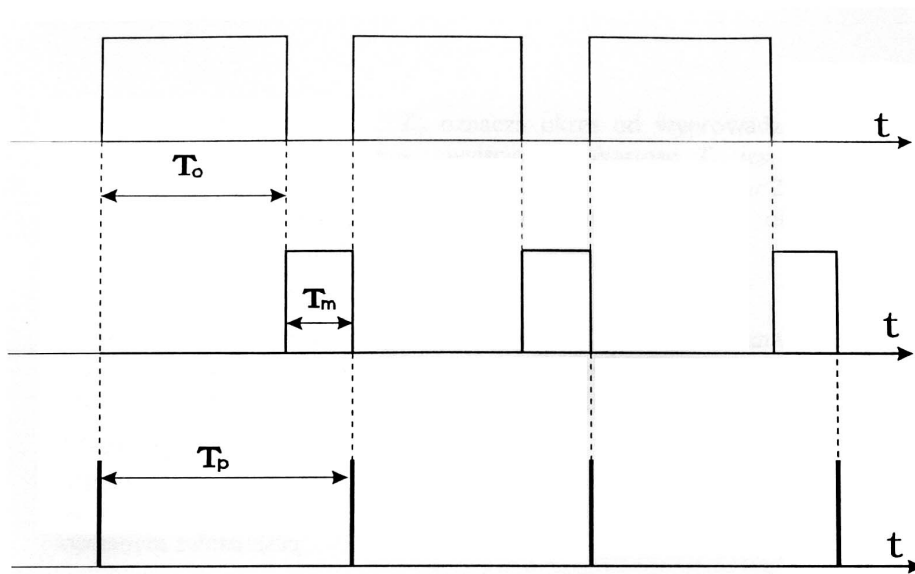
Gwarantujący wymaganą dokładność pomiar przeprowadzony być musi metodami pośrednimi, a zatem czasochłonnymi (np. aparatura optyczno-elektroniczna oparta o kamery CCD z długim czasem naświetlania, fotometryczne czujniki położenia centrycznego [8]).

2. Brak możliwości pracy współbieżnej zadań polegających na obliczaniu wielkości wyjściowej (punkt 1) oraz obliczaniu na jej podstawie sterowania u .

Powyższe ograniczenie wynika stąd, iż praktycznie (zwłaszcza w warunkach polskich) automatyczny system prowadzenia instaluje się dopiero po uruchomieniu teleskopu, w chwili, gdy nie ma już miejsca, albo środków do zainstalowania kilku powiązanych wzajemnie jednostek sterujących. Wyznaczeniem wartości wielkości sterowanej (wyjście obiektu) musi się więc zająć to samo urządzenie które służy do obliczania wartości sterowań.

3. Konieczność impulsowego sterowania członami wykonawczymi układu (silnikami teleskopu).

Poprzez dużą sprawność tego sposobu sterowania nie ma potrzeby stosowania wzmacniaczy wyjściowych regulatora o dużej mocy, wysokiej cenie i dużych gabarytach.



Rysunek 2.5

Kolejność zdarzeń zachodzących w układzie regulacji położenia teleskopu,

T_o - czas obliczenia wartości sygnałów sterujących,

T_m - wielkość czasu opóźnienia układów pomiarowych,

T_p - całkowity okres regulacji.

Ograniczenia te prowadzą do modelu regulatora pracującego cyklicznie. Niech T_o oznacza okres czasu od chwili dokonania pomiaru wielkości wyjściowej do chwili wyprowadzenia policzonego na jej podstawie sterowania (rysunek 2.5). Wielkość T_o określa więc sumaryczny czas przetworzenia wielkości pomiarowych oraz wyznaczenia na jej podstawie sterowania u .

Dodatkowo, niech wielkość T_m oznacza okres od wyprowadzenia sterowania do chwili pomiaru nowej wartości wyjściowej. Wartość T_m jest więc opóźnieniem działania czujników pomiarowych. Zgodnie z założeniem nr 2 zdarzenia procesu regulacji muszą następować po sobie sekwencyjnie, zatem okres jednego cyklu sterowania można wyrazić jako:

$$T_p = T_o + T_m$$

Czas T_m jest przeważnie o wiele mniejszy od T_o . Można przyjąć więc, że pomiar nowych wartości wielkości wyjściowej obiektu następuje w chwilach wyprowadzania sterowania, obliczonego na podstawie starych wartości.

Niech ciąg $t_0, t_1, t_2, \dots$ będzie ciągiem chwil czasowych, w których dokonuje się pomiaru wartości wyjściowej. Działanie regulatora jest opóźnione o jeden okres, można zatem układ sterowania uważać za dyskretny układ regulacji z regulatorem opisanym zależnością:

$$u(t_{i+1}) = \Phi(e(t_i)) \quad (2.12)$$

$$\text{dla } t_0, t_1, t_2, \dots; \quad t_{i+1} = t_i + T_p.$$

Wielkości u, e zostały zdyskretyzowane w chwilach czasu $t_0, t_1, t_2, \dots$, upraszczając więc oznaczenia można powyższą zależność zapisać:

$$u_{i+1} = \Phi(e_i) \quad (2.13)$$

$$\text{dla } i = 0, 1, 2, \dots$$

Wartość okresu próbkowania T_p może być kilkakrotnie mniejsza od stałej czasowej T_2 układów wykonawczych (dodatek 1). Impulsowe sterowanie tymi układami może więc zachodzić z okresem impulsowania równym T_p [13]. W sytuacji stałej częstotliwości impulsów sterujących silniki, oraz stałej amplitudy impulsu (co upraszcza budowę elementów wykonawczych), należy przeprowadzić modulację ich szerokości.

Odpowiednia konstrukcja odwzorowania Φ (definiującego regulator) warunkuje możliwość spełniania przez układ prowadzenia teleskopu przyjętych kryteriów jakości pracy: (2.1), (2.2), (2.3), (2.6). Zagadnienie konstrukcji regulatora, mające podstawowe znaczenie dla działania systemu, stanowi jednak w prezentowanej pracy problem poboczny. Z powyższego względu problem ten został opisany w dodatku 1. W toku przeprowadzonej tam dyskusji wyłoniła się następująca postać odwzorowania Φ (zależność D.18 w dodatku 1):

$$\Phi_{i+1} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \leq i+1}}^n \psi_k(e_{i-k+1})$$

$$\text{gdzie: } \psi_k: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}; \quad k=1, 2, \dots, n$$

$$\text{są odpowiednio dobranymi nieliniowymi funkcjami (wzór D.19)}$$

Odwzorowanie to, uzależniając wartość sygnału wyjściowego regulatora od wartości błędu z kilku poprzednich okresów próbkowania, stanowi istotne rozszerzenie odwzorowania wprowadzonego wzorem 2.13. Wartość odwzorowania D.18 uzależniona jest ponadto od wartości kilkunastu parametrów definiujących funkcje

ψ_k . Dodatek 1 przedstawia również metodę doboru powyższych parametrów, opartą o optymalizację pewnej funkcji kryterialnej (wzór D.37), oraz uzyskane w wyniku jej zastosowania wartości.

Ostatecznie można sformułować wniosek, iż pracujący w oparciu o zdefiniowany algorytm regulacji system prowadzenia teleskopu **spełnia** przy założeniach 1,2, z początku bieżącego podrozdziału, warunki jakości pracy (2.1), (2.2), (2.3), (2.6).

Opisane w dodatku 1 obliczenia, musiały być jednak poprzedzone identyfikacją wszystkich parametrów obiektu regulacji (zgodnie z (2.11) są to parametry: ζ , ω_n , T_2 , K_2). Specyfika obiektu regulacji - teleskopu, wyposażonego w czułą aparaturę badawczą, sprawia, iż nie można zastosować wielu powszechnie znanych [33] metod identyfikacji. W niektórych jednak przypadkach właśnie ta aparatura jest pomocna w wyznaczeniu parametrów obiektu.

Dodatek 2 zawiera opis zastosowanych metod identyfikacji parametrów teleskopu obserwatorium na Suhorze, wraz z oszacowaniem ich dokładności.

3. Wizyjny system sterowania położeniem teleskopu.

W poprzednim rozdziale został zdefiniowany cyfrowy regulator ustawienia teleskopu. Rozważania przeprowadzane były przy założeniu, iż wartość sygnału wyjściowego obiektu regulacji - położenie teleskopu - jest znana. Pomiar tej wartości jest jednak metodą bezpośrednią niemożliwy i dlatego sensor ustalający rzeczywiste (w stosunku do gwiazd) położenie teleskopu jest kluczowym problemem wszystkich systemów prowadzenia teleskopu.

Odpowiednio dokładnie orientację teleskopu można określić poprzez cyfrowe czujniki przemieszczenia. Wyznaczają one jego położenie w stosunku do układu odniesienia związanego z nieruchomymi elementami zamocowania teleskopu (np. w stosunku do fundamentu, na którym osadzony jest teleskop). Orientacja teleskopu powinna być jednak określana i ustalana względem obiektów kosmicznych. Oczywiście nie jest możliwe zainstalowanie na tych obiektach części aparatury pomiarowej. Pozostaje więc wykorzystanie do celów pomiarów położenia - promieniowania jakie wysyłają. Pomiar pozycji teleskopu względem obiektów na niebie jest równoważny pomiarowi pozycji obiektów względem teleskopu. Odpowiednio dokładnie ich usytuowanie można wyznaczyć z pomocą np. interferometru optycznego lub radiowego albo innego teleskopu [9]. Instalacja w obserwatorium opisanych dodatkowych urządzeń (nie mniej precyzyjnych od samego teleskopu) do celów dokładnego prowadzenia jest oczywiście przedsięwzięciem zbyt kosztownym³. Rozsądnym wyjściem jest więc użycie tego samego teleskopu zarówno do obserwacji, jak i do wyznaczania jego położenia.

Położenie obiektów najdokładniej daje się wyznaczyć poprzez ich obraz otrzymywany w płaszczyźnie ogniskowej teleskopu. Toteż niedługo po wynalezieniu teleskopu zaczęto go wyposażać w urządzenia to ułatwiające. Mają one postać okularów zaopatrzonych w krzyże z nici pajęcznych, podziałek, śrub mikrometrycznych itp. Użycie tych urządzeń w prowadzeniu zależy w ostatecznym rachunku od zmysłu wzroku obserwatora. Automatyczny system prowadzenia musi zatem podobnie jak człowiek, mieć możliwość analizy obrazu. Żądania stawiane systemowi (patrz podrozdział 2.1.1) powodują, że analiza ta powinna dawać wiarygodne odpowiedzi na następujące pytania:

³Często jednak (np. w Obserwatorium Słowackiej Akademii Nauk na Tatrzańskej Łomnicy) stosuje się rozwiązanie polegające na zainstalowaniu obok głównego teleskopu, dodatkowego, sprzężonego z nim małego teleskopu. Obraz z kamery telewizyjnej zainstalowanej w jego ognisku umożliwia ręczne sterowanie ruchem głównego teleskopu.

- 3.1 Jakie położenia na obrazie mają znajdujące się tam obiekty?
- 3.2 Czy na podstawie obserwowanych obiektów można określić położenie teleskopu?
- 3.3 Czy zjawiska widziane na obrazie nie oznaczają, iż zaszły zdarzenia nieoczekiwane, wyjątkowe lub awaryjne?

Powyższe pytania postawione są bardzo nieprecyzyjnie. System analizujący obraz aby mógł dać konkretną, użyteczną w sterowaniu odpowiedź, musi przetwarzając informację obrazową odnieść ją do kontekstu aktualnej sytuacji i zadania. Musi więc dysponować w pewnym stopniu ogólną wiedzą o własnościach przetwarzanych obrazów oraz o wymaganiach konkretnego zadania sterowania. Powyższe problemy wchodzą w zakres dziedziny wiedzy - rozpoznawania obrazów.

3.1. Rozpoznawanie obrazów.

W procesie analizy obrazów wyróżnia się zwykle dwa podstawowe etapy.

Początkowy etap - zapamiętanie obrazu w pamięci komputera i określenie pierwotnych cech obrazu - można sformalizować jako efekt działania pewnego odwzorowania:

$$b: Z \rightarrow X \quad [4](3.1)$$

gdzie: Z - rozpoznawany zbiór obiektów bądź zjawisk,

X - przestrzeń ich cech.

Elementami wprowadzonej przestrzeni cech są wektory cech charakteryzujące wybrane własności obiektów widocznych na obrazie (lub całych obrazów). Cechy te przeważnie związane są z jasnością, wielkością, kształtem, fakturą itp. obiektów. W tak rozumianej przestrzeni cech obiekty o podobnych własnościach tworzą pewne skupiska, zwane też klasami. Przy założeniu, że znany jest podział przestrzeni cech na skupiska, zadanie rozpoznania nieznanego obiektu daje się sprowadzić do wskazania klasy zawierającej jego cechy.

Czynność ta, stanowiąca drugi etap i nazywana ogólnie klasyfikacją, da się zapisać jako przekształcenie:

$$e: X \rightarrow I \cup \{i_0\} \quad (3.2)$$

gdzie : I - zbiór indeksów przypisanych poszczególnym klasom (jest on poszerzony o zbiór $\{i_0\}$ symbolizujący brak przynależności obrazu do jakiejkolwiek znanej klasy).

Złożenie przekształceń: eOb odwzorowuje zatem zbiór obiektów Z w zbiór indeksów przypisanych klasom obiektów.

Różnorodność istniejących metod rozpoznawania obrazów [4] sprowadza się głównie do różnorodności konstrukcji odwzorowania e . W większości z nich podstawowe znaczenie ma odpowiednie zdefiniowanie funkcji odległości (metryki) w przestrzeni X . Z pomocą funkcji odległości określana jest bowiem często przynależność obiektów do odpowiednich klas [4].

Efektywność powyższych metod rozpoznawania zależy od odpowiedniego przyjęcia podziału przestrzeni cech X na klasy. W większości metod ustalających ten podział, korzysta się z prezentacji przykładowych obiektów, o których wiadomo że należą do pewnych klas (proces uczenia). W prostych przypadkach do zdefiniowania klasy wystarcza podanie jednego, lub kilku specjalnie dobranych, reprezentatywnych obiektów. Klasa definiowana jest wówczas jako pewne otoczenie tych obiektów w przestrzeni cech X .

3.2. Wprowadzenie do problemu sterowania teleskopem z pomocą systemu wizyjnego.

W rozdziale tym opisany będzie sposób pomiaru położenia obiektów na niebie korzystający z systemu wizyjnego. Wszelkie rozważania dotyczące wstępnego przetwarzania obrazu i recepcji jego cech prowadzone będą właśnie pod kątem możliwości obliczenia położenia obiektów. W dalszej kolejności wielkości te traktowane będą jako sygnał wejściowy regulatora położenia teleskopu. Podrozdział 3.2 ma charakter wprowadzający, zagadnienia w nim poruszane będą dokładnie dyskutowane w dalszej części pracy.

3.2.1. Wstępne przetwarzanie obrazów.

Początkowe procesy analizy obrazów polegają na przeniesieniu obrazu rzeczywistej sceny do pamięci komputera. Odpowiedni dobór urządzeń temu służących związany jest wprawdzie z konkretną implementacją systemu (rozdział 5), jednak ich podstawowe parametry muszą być znane już na etapie tworzenia algorytmów.

Od urządzeń skanujących obraz wymagany jest bardzo krótki czas przetwarzania, oraz duża czułość. Produkowane kamery telewizyjne, standardowo przetwarzają na postać sygnałów elektrycznych 50 obrazów na sekundę. Jest to wielkość kilkakrotnie większa od przyjętej częstotliwości próbkowania regulatora impulsowego, równej

$1/T_p=8.33$ 1/s. Drugim czynnikiem decydującym o wyborze rodzaju przetwornika obrazowego jest jego czułość. Od czułości kamery zależy ilość obiektów w analizowanym obrazie nieba, wpływająca na niezawodność pracy systemu prowadzenia (uwagi końcowe podrozdziału 4.4). Odpowiednią czułość posiadają przeznaczone do pracy w trudnych warunkach oświetlenia kamery CCD oraz kamery z lampą analizującą typu *night-vision*.

Obraz powstały w płaszczyźnie ogniskowej teleskopu można w pewnej wybranej chwili czasu t , traktować jako pewną ciągłą funkcję h ,

$$h: S_1 \times S_2 \rightarrow S ; \quad (3.3)$$

gdzie: $S_1, S_2 \subset \mathbf{R}$ - zbiory określające fragment płaszczyzny, w którym definiuje się obraz;

$S \subset \mathbf{R}$ - zbiór możliwych jasności punktów obrazu;

$\mathbf{R}$ - zbiór liczb rzeczywistych.

Funkcja h przyporządkowuje wybranemu punktowi liczbę określającą jego jasność.

Powstały obraz można poddać detekcji za pomocą kamery. Jej działanie formalizuje się, wprowadzając w $S_1 \times S_2$ pojęcie siatki.

W zbiorach S_1 oraz S_2 można wybrać odpowiednio N_1 i N_2 równoodległych punktów; zbiory powyższych punktów oznaczone będą przez S_1^* i S_2^* . Wybrany punktowi przyporządkowuje się liczby (numery), należące odpowiednio do zbiorów:

$$N_1 = \{0, 1, \dots, N_1 - 1\}, \quad N_2 = \{0, 1, \dots, N_2 - 1\},$$

Przyjmuje się, iż numeracja ta zachowuje porządek elementów tzn:

$$\forall s_i, s_k \in S_r^*: s_i > s_k \Rightarrow i > k; \quad r = 1, 2;$$

gdzie: s_j - punkt o numerze j

Siatką nazywany będzie iloczyn kartezjański $S_1^* \times S_2^*$ zbiorów wybranych punktów.

Działanie kamery polega na próbkowaniu funkcji h w punktach zdefiniowanej powyżej siatki. Powstały w wyniku tego procesu obraz wynikowy można traktować jako funkcję:

$$h': N_1 \times N_2 \rightarrow S' ; \quad (3.4)$$

gdzie: $S' \subset \mathbf{R}$ - zbiór wartości określający jasności punktów siatki.

przyporządkowującą numerom siatki ich jasności. Wartości jasności punktów są wyprowadzane na wyjście kamery w postaci sygnałów elektrycznych. Ich obróbką zajmują się wyspecjalizowane urządzenia typu *frame grabber*. Mają one najczęściej postać kart lub paneli wkładanych do komputera. Sygnały elektryczne wprowadzone na wejście tych urządzeń podlegają procesowi kwantyzacji, a następnie są

zapisywane w pamięci. Skonwertowany w ten sposób obraz można przedstawić funkcją:

$$f: \mathbf{N}_1 \times \mathbf{N}_2 \rightarrow \mathbf{L} ; \quad (3.5)$$

gdzie:

$\mathbf{L} = \{0, 1, \dots, L_{\max} - 1\}$ - zbiór skwantowanych wartości jasności punktów

$L_{\max}$ - ustalona liczba naturalna.

Skwantowane wartości jasności punktów siatki zapamiętywane są w dwuwymiarowej macierzy rozmiaru $N_1 \times N_2$ i o elementach typu całkowitego. Macierz ta jednoznacznie definiuje przekształcenie f , czyli jednoznacznie definiuje skwantowany obraz.

Wymiary macierzy (zależne od karty *frame grabber*) wynoszą najczęściej 256x256 lub 512x512, zaś intensywność każdego punktu jest zakodowana w 16, 256 lub 4096 poziomach szarości.

Pojedynczy punkt obrazu $u_{i,j}$ o współrzędnych i, j , nazywany będzie, pikselem, zaś jego jasność będzie oznaczana przez:

$$l(u_{i,j}) \in \mathbf{L}$$

lub krótko: $l_{i,j}$

gdzie: $i \in \mathbf{N}_1, j \in \mathbf{N}_2$

Zbiór wszystkich pikseli będzie nazywany **obrazem rastrowym**. W obrazie tym da się wyróżnić skupiska pikseli odpowiadające obserwowanym rzeczywistym obiektom. Zbiory te nazywane będą obiektami rastrowymi. Ich definicja równoważna jest z podaniem wszystkich pikseli do nich należących. Obiektami rastrowymi są przede wszystkim teleskopowe obrazy gwiazd, zatem piksele wchodzące w ich skład mają jasność większą od pikseli otoczenia. Jeśli do własności tej dodać fakt, iż zbiór pikseli wchodzący w skład obrazu jednej gwiazdy powinien być spójny, dostaje się następujące kryterium przynależności piksela u do obiektu rastrowego b :

$$u_{i,j} \in b \Leftrightarrow l_{i,j} \geq l_{gr} \wedge \exists r_{k,l} \in b: [(k = i \wedge |j - l| = 1) \vee (j = l \wedge |k - i| = 1)] \quad (3.6)$$

gdzie: l_{gr} - ustalona wartość progowa.

Oznacza to, że zaliczany do obiektu piksel musi mieć odpowiednią jasność oraz w jego bezpośrednim sąsiedztwie musi istnieć piksel należący do obiektu. Wyznaczenie zbioru pikseli obiektu przeprowadzić można znajdując jeden odpowiednio jasny piksel, później zaś piksele spełniające warunek (3.6).

Na podstawie zbioru pikseli można wyznaczyć wektor **b** cech obiektu rastrowego *b*. Przyjęto następujący zestaw cech:

$$\mathbf{b} = (x, y, n, l) \quad (3.7)$$

gdzie: *n* - ilość pikseli tworzących obraz obiektu,

l - jasność obiektu liczona jako suma intensywności jego pikseli.

x, y ∈ ℝ - współrzędne kartezjańskie środka obiektu na obrazie, liczone z zależności:

$$\begin{aligned} x &= 1/n \sum_{u \in b} i \\ y &= 1/n \sum_{u \in b} j \end{aligned} \quad (3.8)$$

Wektor cech obiektu rastrowego nazywany będzie od tej chwili krótko - obiektem. Podobnie, zbiór wektorów cech obiektów nazywany będzie po prostu **obrazem**. Zbiór ten oznaczany będzie przez *o*.

3.2.2. Opis regulatora współdziałającego z systemem wizyjnym.

W zbiorze *o* (zbiór wektorów cech obiektów) jest zawarta informacja o położeniu teleskopu, konieczna do wyznaczenia wartości wejściowych regulatora.

Położenie określane być może na podstawie jednego, kilku lub też wszystkich obiektów należących do obrazu (do zbioru *o*). W najprostszym przypadku, gdy jest to tylko jeden obiekt, musi on być jednak odpowiednio wybrany. Na wstępie zbiór *o* poddaje się selekcji. Odrzucić należy obiekty zarówno zbyt małe (często są rezultatem szumów kamery), jak i zbyt duże (mogą być obrazami mgławic, albo efektami lokalnych zmian czułości kamery), oraz obiekty znajdujące się na obrzeżach obrazu (obrazy tych obiektów mogą być niepełne).

Powstały w wyniku tej operacji obraz *o*₁ jest zbiorem:

$O_1 =$

$$b = (x, y, n, l) \in O: n_{\min} < n < n_{\max} \wedge l_{\min} < l < l_{\max} \wedge x_{\min} < x < x_{\max} \wedge y_{\min} < y < y_{\max} \quad (3.9)$$

gdzie: $n_{\min}, n_{\max}, l_{\min}, l_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ - ustalone liczby.

Położenia teleskopu wyznaczać można na podstawie dowolnie wybranego obiektu z tego zbioru, pod warunkiem jednak zachowania powtarzalności wyboru w ciągu analizowanych obrazów. Łatwo to uzyskać wybierając najjaśniejszy z obiektów. Ostatecznie, analiza obrazu dostarcza parę współrzędnych (x, y) pewnego obiektu. Parę tę można uważać jako wyznaczoną w drodze pomiaru wartość położenia teleskopu. Zadanie syntezy układu regulacji jest zatem wykonane, jeśli tylko układ ten spełnia odpowiednie warunki jakości pracy (punkt 2.1.1).

3.2.3 Analiza jakości regulacji.

3.2.3.1. Dokładność statyczna, dynamiczna oraz wrażliwość na zakłócenia.

Wymaganą dokładność kąтового położenia teleskopu e (podrozdział 2.1.1), podaną w mierze kątowej, można przeliczyć na odpowiadającą jej wielkość ε , mierzoną przesunięciem na obrazie. Przesunięcie to najwygodniej wyraża się w jednostkach odpowiadających odległości między sąsiednimi pikselami (odległość między węzłami siatki próbkowania).

Omawiany związek można zapisać następująco:

$$\varepsilon = e \frac{f}{D} \quad (3.10)$$

gdzie: f - wypadkowa ogniskowa układu optycznego teleskopu [22],

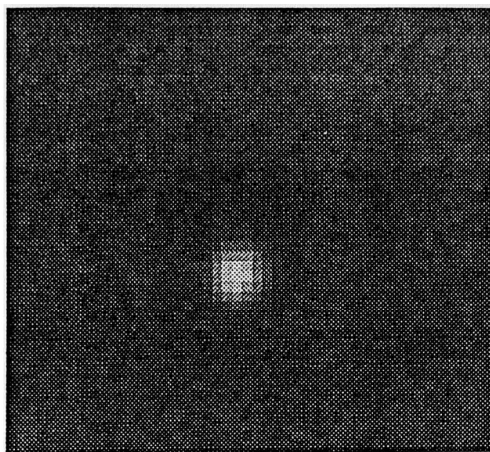
D - rozdzielczość przetwornika obrazowego kamery, zdefiniowana jako odległość pomiędzy sąsiednimi pikselami.

Zależność ta będzie wykorzystywana w dalszych rozważaniach

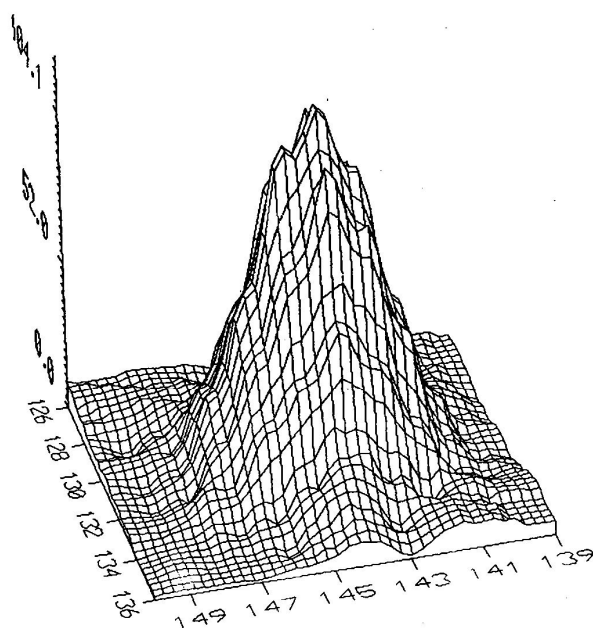
Niedokładność określenia współrzędnych środka gwiazdy na obrazie związana jest w dużym stopniu z jego przestrzennym próbkowaniem. W przypadku obiektu, którego obraz składa się tylko z jednego piksela, maksymalna niedokładność jest oczywiście równa połowie odległości pomiędzy sąsiednimi pikselami siatki. Dla obiektów złożonych, może jednak zachodzić zjawisko wzajemnej kompensacji błędów wprowadzanych przez poszczególne piksele. Problem ten będzie przedstawiony dokładniej.

Rysunek 3.1a przedstawia wycinek obrazu uzyskanego z kamery telewizyjnej, przedstawiający pewną gwiazdę. Rysunek 3.1b jest zaś trójwymiarową ilustracją

obrazu gwiazdy z rysunku 3.2.a, w której jasnościom punktów przyporządkowano współrzędne na osi pionowej.



a)



b)

Rysunek 3.1

a) wycinek obrazu nieba otrzymany za pomocą kamery systemu prowadzenia, przedstawiający pojedynczą gwiazdę,
 b) trójwymiarowy (współrzędna pionowa - jasność) wykres jasności powyższej gwiazdy. Wykres przedstawia funkcję będącą aproksymacją dyskretnej (określonej na siatce pikseli) funkcji jasności gwiazdy. Orientacje osi wykresu 3.1.b oraz obrazu 3.1.a są zgodne.

Nietrudno zauważyć, iż obraz gwiazdy uzyskany w płaszczyźnie ogniskowej teleskopu można przedstawić poprzez pewną regularną funkcję dwu zmiennych. Funkcja ta nazywana będzie dalej **profilem** gwiazdy.

Powszechnie przyjmuje się, iż profil gwiazdy dostatecznie dokładnie [39] opisuje tzw. funkcja Moffata: [38]

$$J(x, y) = C(1 + r^2 / R^2)^{-\beta} \quad (3.11)$$

$$\text{gdzie: } r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$$

C, x_0, y_0, R, β - stałe rzeczywiste;

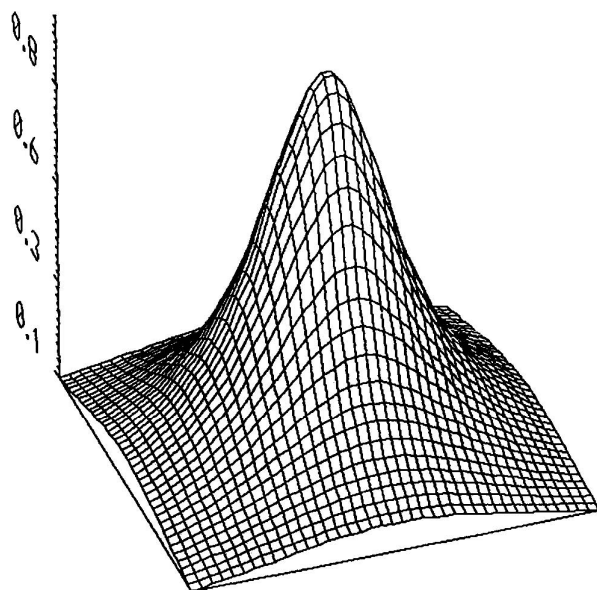
przy czym $C=1$ - stała równa maksymalnej wartości profilu
(w obecnych rozważaniach znormalizowana do jedynki)

Jasność punktów w centrum (o współrzędnych (x_0, y_0)) obrazu gwiazdy jest, zgodnie z powyższym wzorem, równa jeden i maleje do zera wraz ze wzrostem odległości r od centrum. Parametr R określa wielkość obrazu gwiazdy, zaś od parametru β zależy "kształt" profilu.

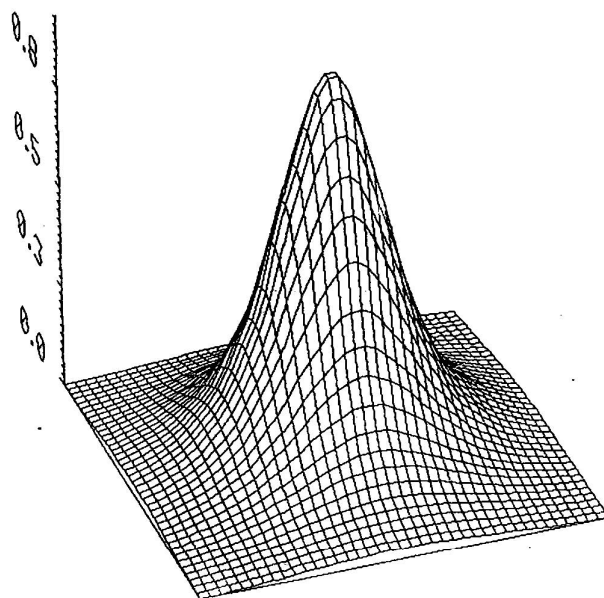
Opisywana funkcja określa sposób przekształcania obrazu świecącego punktu (gwiazda) przez zjawiska *seeingu* oraz błędy optyki teleskopu. Wartości parametrów funkcji Moffata zależą zatem od warunków obserwacyjnych. Są one identyfikowane dla konkretnych, uzyskanych przez obserwacje profili gwiazd [39]. Rysunki 3.2.a, 3.2.b przedstawiają trójwymiarowe wykresy funkcji Moffata dla różnych wartości β (najczęściej $\beta \in \langle 1, 4.3 \rangle$).

Obraz uzyskiwany z kamery jest zaburzony procesem próbkowania (zależność 3.4). Dostępne są zatem tylko uśrednione wartości funkcji profilu dla obszarów wokół punktów próbkowania. Sytuacja ta jest zilustrowana na rysunku 3.3. W kolorze szarym przedstawiono aktywne obszary przetwornika wizyjnego kamery, czyli obszary w których następuje pomiar natężenia światła. W obrazie cyfrowym każdemu z obszarów odpowiada jeden piksel u , o wartości proporcjonalnej do strumienia światła padającego na dany obszar.

W opisanej w punkcie 3.2.1 metodzie, współrzędne (x', y') środka gwiazdy (obiektu) wyznacza się jako średnią współrzędnych pikseli, wchodzących w skład obiektu, czyli (wzór 3.8)



a)



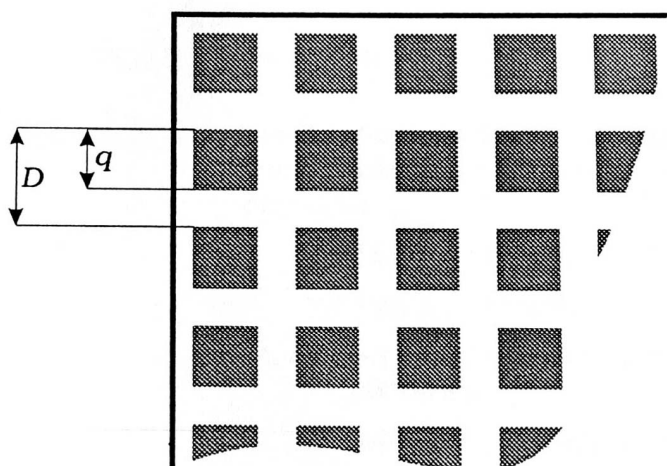
b)

Rysunek 3.2

Przykładowe wykresy funkcji Moffata,

a) dla wartości parametrów: $\beta=1$, $R=2.5$,

b) dla wartości parametrów: $\beta=2$, $R=6$.



Rysunek 3.3
Obszary aktywne przetwornika wizyjnego.

$$x' = 1/n \sum_{u \in b} i$$

$$y' = 1/n \sum_{u \in b} j$$

gdzie: b - obiekt rastrowy (definicja 3.6) złożony z pikseli o jasności nie mniejszej od l_{gr} ,
pozostałe oznaczenia jak w 3.7.

Porównując zatem współrzędne środka gwiazdy obliczone w powyższy sposób (x', y') , oraz współrzędne centrum profilu (x_0, y_0) można określić wartość błędu pomiaru położenia gwiazdy spowodowanego próbkowaniem.

Obliczenie powyższym sposobem przybliżonych współrzędnych centrum profilu wymaga jednak sprawdzenia warunku nałożonego na jasność l piksela ($l \geq l_{gr}$). Jasność piksela $u_{i,j}$ określona jest funkcją profilu następująco:

$$I(u_{i,j}) = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} J(x, y) dx dy \quad (3.12)$$

gdzie: x_1, y_1, x_2, y_2 - granice obszaru, w którym następuje pomiar jasności jednego piksela (obszar aktywny rysunek 3.3) przy czym:

$$x_1 = D_i - q/2, \quad x_2 = D_i + q/2,$$

$$y_1 = D_j - q/2, \quad y_2 = D_j + q/2,$$

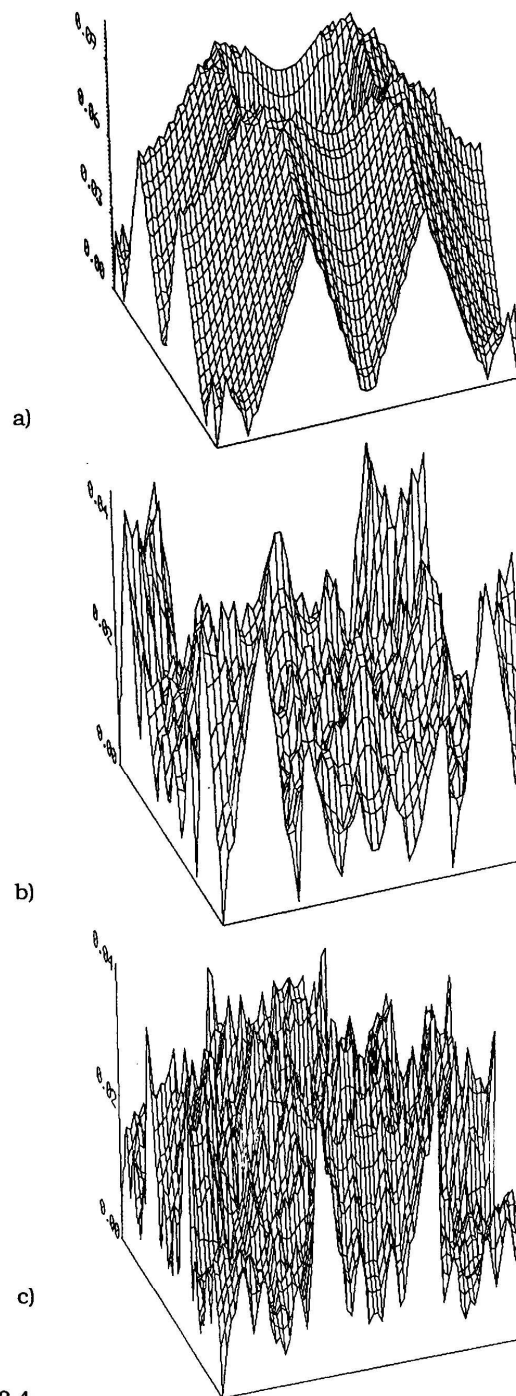
D_i, D_j - współrzędne środka obszaru aktywnego piksela $u_{i,j}$

D - odległość pomiędzy węzłami siatki pikseli,

q - długość boku kwadratu ograniczającego obszar aktywny.

Całkę o podanej postaci łatwo jest obliczyć numerycznie. Wyznaczając zatem zbiór pikseli tworzących obiekt b , można w oparciu o wzór 3.12 obliczyć jego środek (x', y') . Odległość ε_p między położeniem środka profilu i położeniem środka obiektu wyznacza się z zależności:

$$\varepsilon_p = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2}$$



Rysunek 3.4
Wykresy funkcji błędów w wyznaczeniu położenia centralnego profilu, sporządzone dla wartości $l_g=0.1$, oraz dla parametrów profilu:

- a) $\beta=3$, $R=5.3$,
- b) $\beta=2$, $R=3.3$,
- c) $\beta=2$, $R=3$.

Odległość ε_p jest funkcją parametrów x_0, y_0, R, β profilu, parametrów przetwornika obrazowego kamery D, q , oraz wartości l_{gr} .

Nie zmniejszając ogólności rozważań można znormalizować wartość D przyjmując: $D=1$. Po ustaleniu parametrów R, β, q, l_{gr} odległość ε_p staje się funkcją położenia centrum profilu (x_0, y_0) . Rysunki 3.4.a-3.4.c ilustrują przykładowe wykresy tej funkcji. Funkcja $\varepsilon_p(x_0, y_0)$ jest funkcją okresową (co spowodowane jest okresowością siatki), o okresie D (tutaj $D=1$), jej wykres został więc sporządzony tylko dla obszaru: $0 < x_0 < 1, 0 < y_0 < 1$. Maksymalna wartość funkcji ε_p jest jednocześnie największym możliwym błędem pomiaru położenia gwiazdy, co można zapisać:

$$\varepsilon_r = \max_{\substack{0 < x_0 \leq 1 \\ 0 < y_0 \leq 1}} \varepsilon_p(x_0, y_0) \quad (3.13)$$

gdzie: ε_r - błąd pomiaru położenia gwiazdy.

Obliczenie maksimum funkcji $\varepsilon_p(x_0, y_0)$ jest, jak pokazuje jej wykres, trudne. Funkcja nie jest ciągła, ponadto w swoim okresie może mieć wiele różnych maksimów. Jednakże jej wartość można stosunkowo szybko numerycznie wyznaczyć, a zatem do obliczenia wartości maksymalnej funkcji można zastosować jedną z metod przeglądu. W obliczeniach zastosowano prostą metodę przeglądu w M równoodległych punktach (x, y) , należących do okresu funkcji. Obliczenia przeprowadzono dla wybranych wartości parametrów β, q, l_{gr} , oraz dla kilkudziesięciu wartości parametru R . Wyniki symulacji zostały przedstawione w formie wykresów na rysunkach 3.5.a i 3.5.b. Przedstawiają one zależność błędu ε_r od wielkości R' zdefiniowanej wzorem:

$$R' = \sqrt{n/\pi} \quad (3.14)$$

gdzie: n - ilość pikseli wchodzących w skład obrazu gwiazdy⁴.

Wielkość R' może być interpretowana jako pewien zastępczy promień obrazu gwiazdy, w przybliżeniu proporcjonalny do parametru R profilu.

Wykresy sporządzono dla kilku skrajnych (jednak czasem występujących) wartości β i l_{gr} , oraz dla wartości parametru q odpowiadającej najczęściej spotykanym konstrukcjom kamer CCD.

Przedstawione zależności pokazują, iż błąd pomiaru położenia środka gwiazdy w niewielkim stopniu zależy od parametrów β i l_{gr} , natomiast silnie maleje (pomijając lokalne oscylacje) ze wzrostem R' . Jednocześnie promień R' obrazu gwiazdy może być miarą wielkości *seeingu*. Doprowadza to do paradoksalnego stwierdzenia, iż

⁴Wielkość n nieznacznie zależy od położenia centrum profilu, wartość R' wyznaczono zatem dla średniej wartości n w okresie funkcji ε_p .

wzrost *seeingu* (turbulencji atmosfery) poprawia dokładność pomiaru położenia gwiazdy. Istotnie, przy wystarczająco długim czasie ekspozycji obrazu gwiazdy, *seeing* wpływa wyłącznie na "szerokość" profilu (a zatem również na R'), nie zaś na położenie jego centrum. Zwiększenie zaś średnicy R' zmniejsza błędy spowodowane próbkowaniem na płaszczyźnie obrazu.

Zwiększenie wartości R' może być także rezultatem obserwacji obiektów rozciągniętych (np. planety, galaktyki), lub też rozogniskowaniem układu optycznego teleskopu. Przy zachowaniu odpowiedniej jasności obrazu obiektów, doprowadza to również do zmniejszenia błędów pomiaru położenia.

Widoczne na wykresach szybkie zmiany wartości błędu pomiaru ϵ zwłaszcza dla małych wartości R' sugerują, iż ich przyczyną może być niedoskonałość przyjętego sposobu estymacji środka profilu. Włączenie do obiektu pewnego piksela znajdującego się na jego obrzeżu, może bowiem powodować znaczne zmiany w obliczonych (wzór 3.8) współrzędnych środka obiektu. Efekty te można zminimalizować nadając we wzorze (3.8), pikselom bliskim krawędzi obiektu odpowiednio niskie wagi. Piksele te mają oczywiście mniejszą jasność, zatem ona właśnie może być uznana za wagę piksela. Nowa postać wyrażenia określającego współrzędne (x'', y'') środka obiektu jest więc następująca:

$$\begin{aligned} x'' &= 1/L \sum_{u \in b} l(u_{i,j}) i, \\ y'' &= 1/L \sum_{u \in b} l(u_{i,j}) j. \end{aligned} \tag{3.15}$$

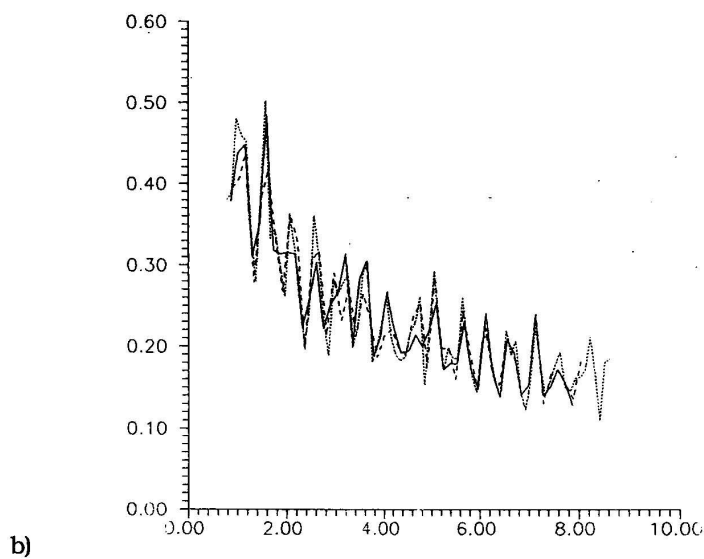
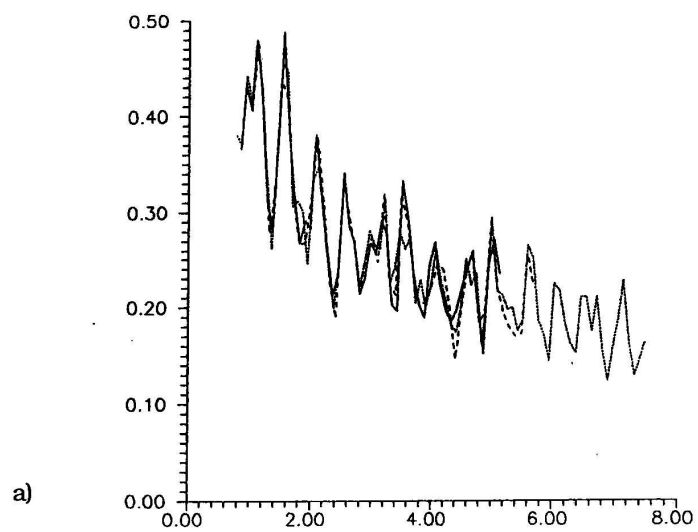
(oznaczenia jak w 3.7)

Rysunki 3.6.a 3.6.b przedstawiają wykresy funkcji $\epsilon_r(R')$ liczonej z uwzględnieniem powyższej zależności. Wartości parametrów β, q, l_{gr} są przy tym identyczne jak dla wykresów 3.5.a 3.5.b. Można zauważyć, iż zaproponowany powyżej sposób określania współrzędnych środka obiektu prowadzi do około dwukrotnego (w porównaniu z poprzednią metodą) zmniejszenia błędu ϵ pomiaru położenia. Dla obiektów $R' > 3$ ($n > 28$) błąd pomiaru położenia może mieć wartość równą zaledwie 1/10 odległości między pikselami siatki.

Niestety, zaprezentowane powyżej bardzo optymistyczne wyniki, dotyczą sytuacji, w których obraz uzyskiwany jest po długich ekspozycjach.

W drganiach atmosfery można wyróżnić składowe o okresach od 0.5 do 120 milisekund [39]. Ekspozycja w czasie wielokrotnie większym od najdłuższej składowej doprowadza do uśrednienia funkcji natężenia promieniowania. Dopiero wówczas można tę funkcję odpowiednio dokładnie przybliżyć profilem Moffata. Przy krótkich ekspozycjach mogą zostać zarejestrowane krótkookresowe zmiany funkcji natężenia promieniowania.

Rysunek 3.7.b przedstawia trójwymiarowy wykres jasności gwiazdy (rysunek 3.7.a) z dobrze widoczną niesymetrią funkcji jej jasności. Zdjęcie sporządzono przy czasie ekspozycji równym 20 milisekund.



Rysunek 3.5

Wykresy przedstawiające zależność maksimum funkcji błędów w wyznaczeniu położenia centralnego profilu, od wartości parametru R' .

Linia kropkowana jest wykresem sporządzonym dla parametru profilu $\beta=1$,

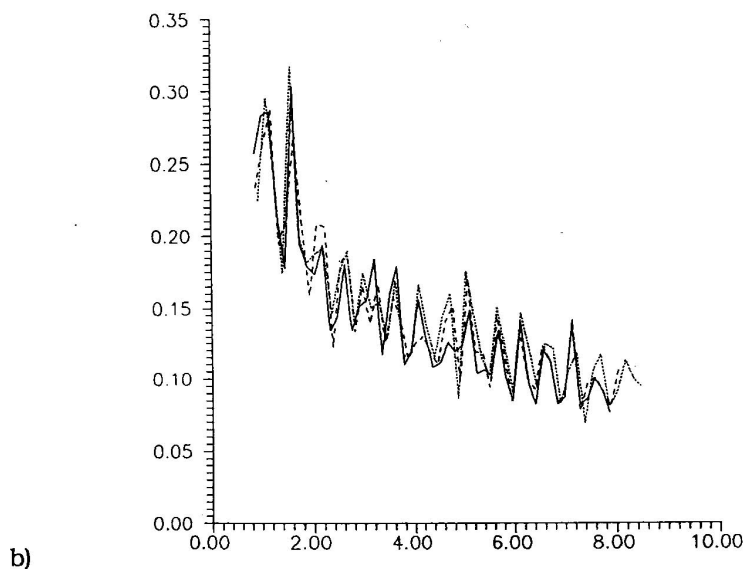
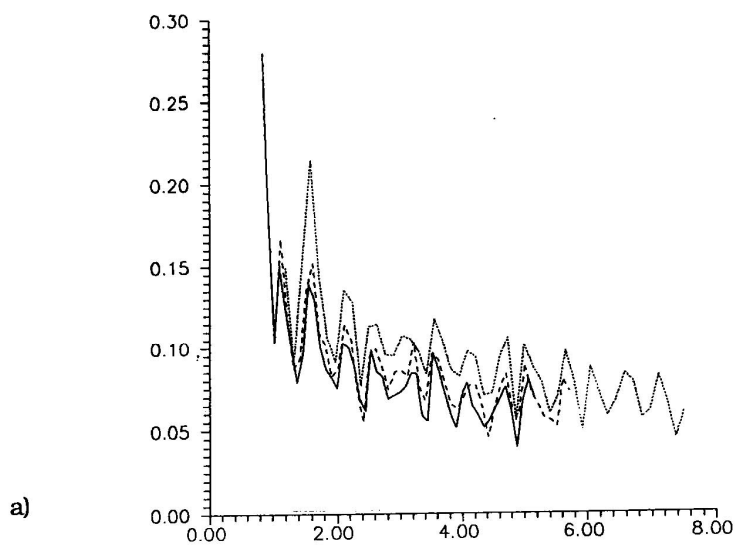
linia kreskowana, odpowiednio - $\beta=2$,

linia ciągła - $\beta=3.4$.

Wykresy sporządzono dla wartości l_g równych:

a) 0.1,

b) 0.4.



Rysunek 3.6

Wykresy przedstawiające zależność maksimum funkcji błędów w wyznaczeniu położenia centralnego profilu, od wartości parametru R' .

Położenie centralne wyznaczone jest metodą uwzględniającą różne wagi pikseli.

Linia kropkowana jest wykresem sporządzonym dla parametru profilu $\beta=1$,

linia kreskowana, odpowiednio - $\beta=2$,

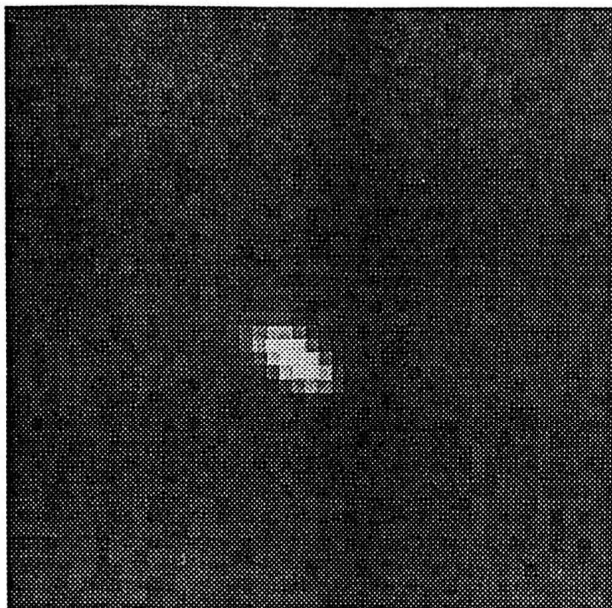
linia ciągła - $\beta=3.4$.

Wykresy sporządzono dla wartości l_{gr} równych:

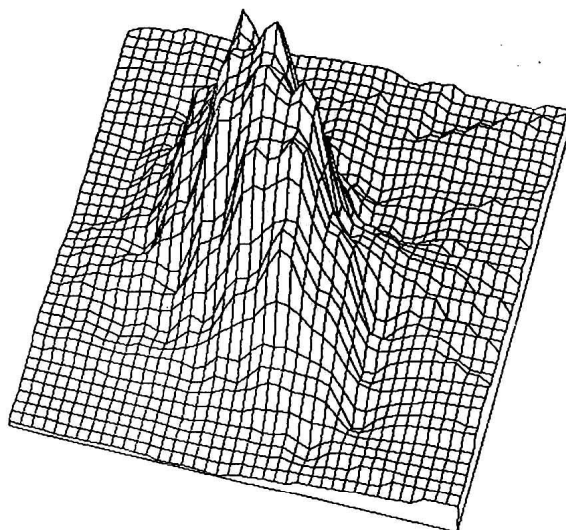
a) 0.1,

b) 0.4.

a)



b)



Rysunek 3.7

- a) niesymetria obrazu gwiazdy, spowodowana działaniem seeingu.
- b) trójwymiarowa ilustracja powyższego obrazu.

Związek wielkości błędu pomiaru położenia i długości ekspozycji, uzależniony jest od parametrów *seeingu*, związanych z konkretnymi warunkami obserwacji. Parametry te, zwłaszcza maksymalny okres drgań atmosfery, są trudne do wyznaczenia. Najczęściej zatem, wyznacza się błąd pomiaru położenia środka gwiazdy ε_r , przy zadanym czasie ekspozycji, doświadczalnie. Prosty eksperyment polega na wielokrotnym pomiarze położenia prawie nieruchomych obiektów (gwiazdy okolic bieguna) o różnej wielkości, przy ustalonym czasie ekspozycji.

W doświadczeniach przeprowadzonych z udziałem teleskopu na Suhorze uzyskano maksymalną wartość błędu pomiaru równą $\varepsilon_{\text{pom}}=0.27$, odpowiadającą czasowi ekspozycji 40 milisekund. Wartości tej odpowiada błąd wyrażony w jednostkach kątowych (zależność $3 \cdot 10^5$ równy: $e_{\text{pom}}=1.25 \cdot 10^{-6}[\text{rad}] = 0.25''$).

Dla podanej wartości e_{pom} została przeprowadzona opisana w podrozdziale 2.3.1.3 optymalizacja parametrów regulatora nieliniowego zdefiniowanego wzorem (3.31). Regulator ten spełnia określone tabelą 2.1 kryteria dokładności statycznej, dynamicznej, oraz wrażliwości na zakłócenia; pozostaje zatem sprawdzenie spełniania kryterium niezawodności.

3.2.3.2. Niezawodność pracy układu regulacji.

Badając niezawodność działania układu regulacji należy oszacować prawdopodobieństwo wystąpienia błędu prowadzenia w ciągu pewnego czasu. Rozważania prowadzone będą przy założeniu bezawaryjnej pracy używanego w pomiarach i obliczeniach sprzętu.

Niech w skład obrazu wchodzi dwa obiekty b_1, b_2 mające podobną jasność. Możliwy jest przypadek obliczania sygnału wyjściowego regulatora na podstawie położenia jednego lub drugiego, w zależności od tego, który obiekt będzie w danej chwili jaśniejszy. Prowadzi to do ewidentnych błędów w prowadzeniu teleskopu oraz do powstania oscylacji jego położenia, o dużych amplitudach.

Fluktuacje jasności obiektów spowodowane są głównie szumami kwantowymi kamery, zatem przy pominięciu błędów kwantyzacji można przyjąć, że jasność I pewnego obiektu, traktowana w kolejnych momentach czasu jako zmienna losowa, ma rozkład normalny.

Czyli:

⁵Przy ogniskowej teleskopu $f=7\text{m}$, oraz rozdzielczości kamery $D=0.038\text{mm}$ (dane dla teleskopu i kamery obserwatorium na Suhorze).

$$g(l) = N[\sigma, L](l) = 1/\sqrt{2\pi}\sigma e^{-(l-L)^2/2\sigma^2} \quad (3.16)$$

gdzie: $g(l)$ - funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej jasności obiektu.

L, σ - dodatnie stałe rzeczywiste ⁶.

Niech jasność l_1 pierwszego obiektu b_1 ma rozkład $N[\sigma, L_1](l_1)$. Zgodnie z założeniem jasności obiektów mają zbliżoną wartość, można zatem przyjąć, iż parametr σ rozkładu jest dla obu obiektów identyczny. Jasność l_2 obiektu b_2 ma zatem rozkład $N[\sigma, L_2](l_2)$.

Przy powyższych założeniach należy oszacować prawdopodobieństwo p zdarzenia:

$$\begin{aligned} &\text{w pierwszym pomiarze zachodzi:} && l_1 > l_2 \\ &\text{oraz w pewnym ustalonym następnym pomiarze:} && l_1 < l_2. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Po utworzeniu różnicy zmiennych losowych:

$$r = l_1 - l_2$$

rozpatrywane zdarzenie polega na spełnieniu w pierwszym pomiarze warunku: $r > 0$, w następnym: $r < 0$. Jasności obiektów l_1 oraz l_2 są zmiennymi losowymi niezależnymi, zatem zmienna r ma wariancję:

$$\sigma' = \sqrt{2} \sigma$$

Różnicę r można zatem przedstawić w postaci:

$$r = l_1' - L_2$$

gdzie: l_1' - zmienna losowa o rozkładzie $N[\sigma', L_1](l_1')$.

Fluktuacja różnicy jasności dwu obiektów sprowadzają się zatem do odpowiednio powiększonej fluktuacji jasności pierwszego obiektu.

Problem (3.17) można więc zastąpić równoważnym:

$$\begin{aligned} &\text{w pierwszym pomiarze zachodzi:} && l_1' > L_2 \\ &\text{oraz w pewnym ustalonym następnym pomiarze:} && l_1' < L_2. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Zatem prawdopodobieństwo p (3.17) wyrazić można wzorem:

⁶Zależność jest słuszna dla L wielokrotnie większego od σ , interpretacja fizyczna zmiennej l (jasność) wyklucza bowiem przypadek: $l < 0$.

$$p(L_1, L_2) = \int_{-\infty}^{L_2} N(\sigma', L_1) dx \cdot \int_{L_2}^{\infty} N(\sigma', L_1) dx \quad (3.19)$$

Funkcja $p(L_1, L_2)$ podaje prawdopodobieństwo wystąpienia błędu w czasie analizy pewnego ustalonego obrazu. Ponieważ zaś, jednemu okresowi próbkowania T_p odpowiada analiza jednego obrazu, prawdopodobieństwo $p(L_1, L_2)$ odnosi się do okresu czasu T_p .

Wprowadzone kryterium niezawodności (2.7) oznacza więc konieczność spełnienia nierówności:

$$p/dt = p(L_1, L_2) / T_p < v_{gr} \quad (3.20)$$

Po podstawieniu do (3.19): zależności: $x' = x - L_1$, $L_r = L_2 - L_1$, oraz uwzględniając powyższą nierówność otrzymuje się:

$$p(L_1, L_2) = \int_{-\infty}^{L_r} N(\sigma', 0) dx' \cdot \int_{L_r}^{\infty} N(\sigma', 0) dx' < T_p v_{gr} \quad (3.21)$$

Dla wartości $v_{gr} = 2.31 \cdot 10^{-5}$, (tabela 2.1) $T_p = 0.12$ (tabela 2.x) można wyznaczyć wartość L_r spełniającą powyższą nierówność.

Zadanie to łatwo jest rozwiązać numerycznie, metodą podziałów dychotomicznych [29], w której całki oznaczone $p(L_1, L_2)$ oblicza się korzystając ze wzoru Simpsona [29].

W rezultacie otrzymuje się zależność:

$$|L_1 - L_2| > 4.69 \sigma' \quad (3.22)$$

Odpowiednia niezawodność systemu jest więc zapewniona, jeśli różnica pomiędzy średnimi jasnościami dwu najjaśniejszych gwiazd jest większa niż $4.69 \sigma'$ (przykładowo, dla wartości L_1 rzędu 800, oraz parametru $\sigma = 50$ ($\sigma' = 65.4$), dostaje się warunek : $|L_2 - 800| > 324$).

Sytuacje, w których różnica ta jest mniejsza od $4.69 \sigma'$, zdarzają się jednak często. Występuje wtedy konieczność ingerencji obserwatora, polegającej na przesunięciu kamery w płaszczyźnie ogniskowej teleskopu i wyborze nieco innego fragmentu nieba do analizy. Niestety, w przypadku prowadzenia obserwacji w okolicach nieba o dużym nagromadzeniu gwiazd, odpowiedniego fragmentu wybrać nie można.

W sytuacjach tych, układ prowadzenia teleskopu oparty o zaproponowany sposób działania systemu wizyjnego nie spełnia narzuconego kryterium niezawodności. Zachodzi więc konieczność poszukiwania algorytmów bardziej niezawodnych.

4. Regulacja położenia teleskopu jako regulacja obrazu.

Wizyjny system regulacji opisany w punkcie 3.2 był klasycznym układem regulacji z wyróżnionym sygnałem błędu regulacji oraz sygnałem sterującym. Rola algorytmów przetwarzania obrazów ograniczała się tylko do pomiaru wielkości podlegającej regulacji (położenia teleskopu). Zredukowana do postaci dwuwymiarowego wektora (położenie na płaszczyźnie) informacja obrazowa okazała się (podrozdział 3.2.3.2) w wielu praktycznych sytuacjach niewystarczająca. W poszukiwanym modelu systemu regulacji należałoby zatem uwzględnić znacznie szerszy zestaw cech obrazu. W skrajnym przypadku, eliminując jakąkolwiek redukcję informacji w procesie przetwarzania obrazu, należy wprowadzić na wejście regulatora po prostu nieprzetworzony obraz. Regulator porównując ten obraz, z obrazem zadany, powinien tak oddziaływać na obiekt sterowania, aby różnice pomiędzy obrazami zminimalizować. Spotykane niezgodności między obrazami należą do różnorodnych typów. Algorytmy ich likwidacji muszą więc być dobierane do każdego z typów indywidualnie. Wymaga to dysponowania przez system regulacji zasobem informacji o możliwych postaciach obrazów wejściowych.

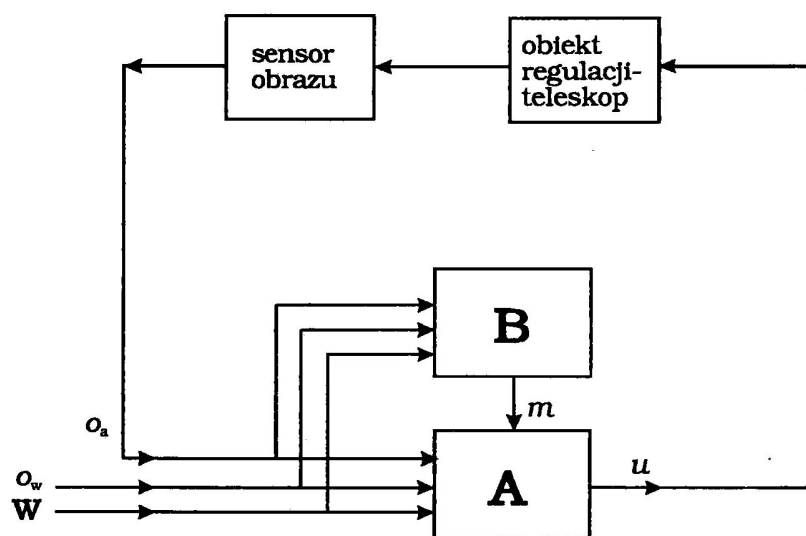
Powyżej naszkicowany sposób działania układu regulacji można porównać do działań człowieka próbującego wyregulować⁷ zły obraz telewizyjny. Mając wyobrażenie o tym jak powinien wyglądać dobry obraz używa on wszelkich możliwych pokręteł, aby obraz do tej postaci sprowadzić. Stosuje przy tym sposoby stosowne do rodzajów defektów obrazu telewizyjnego. Jeśli dodatkowo jest w dziedzinie tej praktykiem, posiada wiedzę o możliwych objawach rozregulowania.

Rysunek 4.1 przedstawia prostą strukturę układu regulacji spełniającego opisane wyżej postulaty. Regulator posiada kilka sygnałów wejściowych. Są nimi: aktualny obraz wejściowy o_a , obraz zadany o_z oraz zbiór pewnych specyficznych obrazów wejściowych W . Zbiór ten stanowi zasób dodatkowych informacji, symptomów rozregulowania. W układzie wyodrębniono część **A** odpowiadającą regulatorowi pracującemu zgodnie z pewnym zadany algorytmem a_i . Wejściem dla tego układu są obrazy: aktualnie pobrany o_a , zadany o_z , oraz obrazy ze zbioru W , a także sygnał określający sposób jego działania m . Część **A** wyprowadza sygnał sterujący u , bezpośrednio oddziałując na obiekt sterowania.

Druga część regulatora **B**, jest układem decyzyjnym wybierającym algorytm działania części **A**.

Przy ustalonym zbiorze W oraz obrazie zadany o_z decyzja jest zależna od postaci obrazu wejściowego o_a . Część **B** pełni więc rolę klasyfikatora obrazu o_a . Jej działanie opierać się więc musi na metodach rozpoznawania obrazów.

⁷potocznie rozumienie w języku polskim słowa "regulować" bardzo dobrze oddaje sens użytego w tym miejscu pojęcia.



Rysunek 4.1
Struktura układu regulacji obrazów.

4.1. Model regulatora obrazu w systemie prowadzenia teleskopu.

Pierwotnym zagadnieniem syntezy regulatora wizyjnego, o postaci przedstawionej w poprzednim rozdziale, jest określenie zasad klasyfikacji obrazu wejściowego.

Opisany w podrozdziale 3.2 układ działał w niektórych sytuacjach błędnie. Obok podstawowego zagadnienia, jak mierzyć przesunięcie wyznaczone przez pewien układ gwiazd powstaje pytanie: kiedy układu gwiazd na obrazie może w sposób pewny określić położenie teleskopu. Dzieje się tak wówczas, gdy obraz nieba jest w jakiś sposób podobny do obrazów towarzyszących znanemu położeniu teleskopu. Obrazy te wyznaczają pewne klasy. Klasom mają odpowiadać odpowiednie metody regulacji. Zatem w problemie wyróżnienia klas kryterium ich doboru powinno odpowiadać raczej możliwościom posiadanych algorytmów regulacji, nie zaś typom obrazów.

Jeden z algorytmów został już opisany w podrozdziale 3.2. Przy niewielkich przesunięciach (mieszczących się w granicach obrazu) sprowadza on położenie teleskopu do wartości zadanej. Również obraz dostarczany z kamery sprowadzony jest do postaci obrazu zadanego. Algorytmy regulacji nie mogą jednak sprowadzić aktualnego obrazu do dowolnej zadanej postaci. W tym sensie teleskop z sygnałem wyjściowym w postaci obrazu nie jest obiektem sterowalnym [10] (nie można na

przykład tak sterować położeniem teleskopu, aby dowolnego układu gwiazd otrzymać identyczny z wyjątkiem jednej, wybranej gwiazdy, której w nowym układzie w ogóle nie będzie). Obraz zadany musi zatem należeć do pewnego zbioru obrazów dopuszczalnych, odpowiadających pewnym fragmentom nieba. Podobnie, obrazy świadczące o rozregulowaniu muszą również do zbioru tego należeć. Obrazom tym odpowiadają znane położenia teleskopu, zatem algorytmy regulacji z nimi związane powinny realizować proste przesunięcia teleskopu ze znanego położenia aktualnego, do położenia zadanego.

Przedstawione uwagi prowadzą do wyróżnienia w przestrzeni obrazów następujących klas:

1. Klasa K_1 obrazów do której należą obrazy podobne lecz przesunięte w stosunku do obrazu zadanego oraz obraz zadany (terminy podobne i przesunięte będą sprecyzowane później).

Klasie tej mają odpowiadać omówione w rozdziale 3 dyskretne algorytmy regulacji (np. regulator proporcjonalny (2.14) lub nieliniowy (2.31)).

2. Klasa K_2 obrazów nie podobnych do obrazu zadanego, ale podobnych do któregoś z obrazów pomocniczych należących do zbioru W (rysunek 4.1).

Sprowadzenie ich do obrazu zadanego wymaga użycia innych metod.

3. Klasa K_3 obrazów świadczących o powstałych nekorygowalnych błędach w prowadzeniu teleskopu (np. nagła znaczna zmiana jego orientacji).

Sytuacjom tym nie powinno towarzyszyć wywołanie jakichkolwiek algorytmów regulacji (algorytm pasywny).

Zaklasyfikowanie obrazu do jednej z powyższych klas umożliwia podanie odpowiedzi na pytania Z 3.2 i Z 3.3 przedstawione na początku rozdziału 3. Wiarygodne wyznaczenie położenia teleskopu możliwe jest zatem wówczas, gdy obraz wejściowy należy do klasy K_1 lub K_2 . Sytuacje alarmowe natomiast związane są zaklasyfikowaniem obrazu do klasy K_3 .

Przedstawiony problem klasyfikacji wymaga zdefiniowania wektora cech opisującego obraz, oraz miary odległości między obrazami.

4.2. Wybór wektora cech opisujących obraz oraz funkcji odległości między obrazami.

W rozważanym zagadnieniu podstawowe znaczenie ma określenie przestrzeni cech całego obrazu. Poprzedzać je musi podanie użytecznej definicji samego obrazu. Definicja ta uwzględniać musi szeroki wachlarz możliwych informacji obrazowych oraz musi dać się odnieść do konkretnych struktur danych. Właśnie brak możliwości rozszerzenia użytego w punkcie 3.2.1 pojęcia obrazu jest jedną z przyczyn trudności w ulepszeniu podanej tam metody prowadzania teleskopu.

Termin **obraz** używany był dotychczas w następujących znaczeniach:

- pewnej funkcji (funkcje h, h', f ; podrozdział 3.2.1),
- obrazu rastrowego (podrozdział 3.2.1),
- zbioru wektorów cech obiektów (podrozdział 3.2.1).

Dodatkowo obraz wygodnie jest czasem utożsamiać z pewnym globalnym wektorem jego **cech**. Podobna sytuacja występuje w rozumieniu znaczenia pojęcia **obiekt**. Obiekt został zdefiniowany jako zbiór pikseli, ale wygodniej jest używać tego pojęcia w odniesieniu do wektora jego cech (podrozdział 3.2.1). Opisywane terminy wprowadzone zostały jako produkty pewnych przekształceń. Chcąc zatem dokładnie je usystematyzować należy przestudiować działanie owych odwzorowań.

Opisane już w pracy sposoby przetwarzania sygnału wizyjnego można traktować jako pewne etapy głównego zadania przetwarzania informacji. W etapach tych wyodrębnić można kilka wspólnych cech, pozwalających na traktowanie ich jak szczególne przypadki ogólnego, abstrakcyjnego zadania etapowego. Powyższe uwagi precyzyjniej można wyrazić następującymi punktami:

1. Podstawowe zadanie zostaje rozłożone na pewną ilość podzadań, etapów.
2. Celem każdego, k -tego etapu jest utworze pewnego wektora $\mathbf{o}$, opisującego badane zjawisko. Przestrzeń tych wektorów oznaczana będzie przez $\mathbf{O}_k$.
3. Każdy k -ty etap można rozbić na sekwencję zdarzeń:
 - utworzenie pewnego zbioru obiektów (nowych struktur danych) jako funkcji struktur danych zdefiniowanych we wcześniejszych etapach; tworzone obiekty nazywane będą obiektami k -tego etapu; przestrzeń do której należą będzie oznaczana przez $\mathbf{B}_k$, natomiast przestrzeń zbiorów obiektów oznaczana będzie poprzez $\mathbf{S}_k$;
 - wyznaczenie wektorów cech opisujących wszystkie obiekty k -tego etapu; każda współrzędna (cecha) może być funkcją elementów dowolnej, zdefiniowanej wcześniej przestrzeni; przestrzeń wektorów obiektów k -tego etapu oznaczana będzie przez $\mathbf{C}_k$,
 - ustalenie wektora $\mathbf{o}$ opisującego zjawisko ($\mathbf{o} \in \mathbf{O}_k$) jako zbioru wektorów cech obiektów k -tego etapu.

Zadanie k -tego etapu polega zatem na transformacji przestrzeni zjawisk zdefiniowanych we wcześniejszych etapach w pewną nową przestrzeń $\mathbf{O}_k$. Transformacja przebiega drogą pośrednią, opierającą się na wykorzystaniu cech obiektów pomocniczych. Konstrukcja transformacji powinna być taka, by w kolejnych przestrzeniach wybrane własności zjawisk były lepiej odróżnialne, oraz by przejściom między przestrzeniami towarzyszyła redukcja nadmiaru informacji o zjawisku.

Pierwszy ($k=1$) etap przetwarzania informacji zapisać można w formie przekształcenia:

$$\mathbf{o}^1 = \eta_1(z) ;$$

przy czym $z \in \mathbf{Z}$ jest zjawiskiem, zaś $\mathbf{o}^1 \in \mathbf{O}_1$ wektorem je opisującym.

A zatem, $\mathbf{o}^1$ jest obrazem punktu z w tym przekształceniu. Widać, że wprowadzony w poprzednich podrozdziałach intuicyjny termin "obraz" należy odnieść do wielkości $\mathbf{o}^1$. W następnych etapach przetwarzania powstają nowe (należące do nowych przestrzeni) wektory $\mathbf{o}^k$. Uzasadnione jest więc nadanie każdemu z nich nazwy "obraz". W przypadkach budzących wątpliwości nazwę tę będzie się uzupełniło numerem etapu w jakim został utworzony.

	obiekt etapowy	wektor opisujący obiekt	obraz jako zbiór wektorów obiektów
zadanie 1 etapu- recepca obrazu przez kamerę	pixel $b^1 \in B_1$	$b^1 = (i, j, l) \in C_1$	$o^1 \in 2^{C_1}$
zadanie 2 etapu- wyodrębnienie obrazów gwiazd	zbiór wektorów pixeli $b^2 \in 2^{C_1}$	$b^2 = (x, y, n, l) \in C_2$	$o^2 \in 2^{C_2}$
zadanie 3 etapu- wybór reprezenta- tywnego obiektu	$b^3 \in C_2$	$b^3 = o^2 \in C_2$	$o^3 \in C_2$

Rysunek 4.2

Procesy etapowe, oraz odpowiadające im formy informacji obrazowej, odpowiadające metodzie analizy obrazów przedstawionej w 3.2.2.

4.2.1. Przetwarzanie obrazów jako proces wieloetapowy.

W kategoriach opisanego wyżej schematu łatwo przestawić wprowadzone już w punkcie 3.2.1. wstępne procesy przetwarzania obrazów systemu prowadzenia teleskopu. Informacja o zjawisku jakie system musi rozpoznać jest przetwarzana w trzech wyraźnie zaznaczających się etapach. Są to:

- 1) utworzenie obrazu rastrowego w postaci zbioru pikseli,
- 2) wyodrębnienie spójnych figur - obiektów,
- 3) określenie cech obrazu.

Rysunek 4.2 przedstawia w postaci diagramu wymienione procesy, oraz właściwe dla każdego z etapów formy informacji obrazowej.

Pierwszy etap polega na percepcji wizualnych własności zjawiska. Za obiekty pierwszego etapu można przyjąć punkty na płaszczyźnie, tworzące dwuwymiarowy obraz. Pierwszy etap jest realizowany przez urządzenie techniczne, zatem obiekty (piksele) mają materialny wymiar. Obiekty te są dostępne tylko za pośrednictwem tworzonych przez urządzenie wektorów ich cech. Są nimi trójki:

$$\mathbf{b}^1 = (i, j, l) \quad (4.1)$$

określające położenie (i, j) oraz jasność (l) obiektów (pierwszego etapu). Przestrzeń tych wektorów oznaczona jest przez C_1 . Obraz $\mathbf{o}^1$ pierwszego etapu jest zbiorem powyższych wektorów. Oznaczając przez 2^C zbiór wszystkich podzbiorów zbioru C , można zapisać: $\mathbf{o}^1 \in 2^{C_1}$. Czyli przestrzeń obrazów: $O_1 \subset 2^{C_1}$.

Obraz pierwszego etapu, może być uważany również za funkcję (podrozdział 3.2.1):

$$f: N_1 \times N_2 \rightarrow L$$

Funkcja ta jest jednoznacznie określana zbiorem trójek (4.1), zatem definicja obrazu jako pewnego zbioru wektorów $\mathbf{o}^1$ jest jednocześnie definicją obrazu jako funkcji f .

W drugim etapie następuje utworzenie spójnych obszarów (odpowiadających gwiazdom) będących zbiorami wektorów cech pikseli. Są to obiekty drugiego etapu (w poprzednich podrozdziałach nazywane po prostu obiektami). Każdemu z obiektów przypisuje się wektor cech $\mathbf{b}^2 \in C_2$ (zgodnie z 3.20. $\mathbf{b}^2 = (x, y, n, l)$). Obraz drugiego etapu to zbiór powyższych wektorów. Przestrzenią drugiego etapu jest $O_2 \subset 2^{C_2}$.

W metodzie przedstawionej w punkcie 3.2.2 trzeci etap polegał na wybraniu pojedynczego obiektu drugiego etapu i utożsamieniu własności całego obrazu z jego własnościami. Wówczas: $C_3 = C_2$ oraz $O_3 = C_3$.

4.2.2. Dyskusja sposobu wydzielenia zadań etapowych oraz definiowania obiektów etapowych i ich wektorów.

Wprowadzony podział zadania na etapy wykorzystany będzie w badaniu różnych możliwych sposobów tworzenia cech obrazu. Punktem wyjścia będzie istniejący już sposób ich definicji. O wyborach optymalnych rozwiązań zadecydują dwa kryteria. Kryterium istotności informacji niesionej przez daną strukturę, oraz kryterium kosztu jej uzyskania. Niestety, często kryteria te trudno opisać ilościowo, decyzje zatem podejmować należy na podstawie ogólnych przesłanek i doświadczenia. Często przyjęcie określonej postaci informacji spowodowane jest istnieniem efektywnych metod jej przetwarzania. Prędkość przetwarzania danych ma bowiem w rozważanym zadaniu decydujące znaczenie.

4.2.2.1. Procesy pierwszego etapu.

Na procesy pierwszego etapu, realizowane przez urządzenia optoelektroniczne, twórca systemu sterowania nie ma praktycznie żadnego wpływu. Efekt ich działania, obraz pierwszego etapu, charakteryzuje się określonymi parametrami (liczba pikseli, liczba poziomów kwantowania jasności piksela), które można co najwyżej pogorszyć. Korzyścią byłaby w takim wypadku pewna redukcja informacji. Jest to jednak droga zmniejszania wszelkiej, a nie tylko nadmiarowej informacji i jako taka nie jest do zaakceptowania.

4.2.2.2. Procesy drugiego etapu.

Przechodząc do drugiego etapu należy na zapytać, czy powinien on dotyczyć analizy pewnych lokalnych fragmentów obrazu, czy też powinien zająć się określeniem globalnych jego cech. Jednak w globalnym opisie obrazu wykorzystane bywają najczęściej różnorodne jego cechy lokalne. Cechy te wygodnie jest zatem ustalić już na poziomie obecnego, drugiego etapu (w powszechnie stosowanej terminologii metody rozpoznawania obrazów opierające się na wykorzystaniu cech lokalnych uważane są za tzw. metody strukturalne [4]).

4.2.2.2.a. Dyskusja definicji obiektu drugiego etapu.

Należy jednak przedyskutować użyteczność podanej w rozdziale 3.2 definicji obiektu. Struktura ta powinna w miarę dokładnie odwzorowywać możliwe do recepcji własności pojedynczych gwiazd (przedmiotów wchodzących w skład zjawiska).

W definicji (3.6) przyjmuje się, iż obraz gwiazdy jest figurą spójną. Nie zawsze musi to być prawdą. Dyfrakcja światła, oraz *seeing* (punkt 2.1.1) atmosfery powodują częste rozczłonkowanie obrazów gwiazd. Automatyczna analiza tych zjawisk, oparta o falowe własności światła lub metody statystyczne byłaby jednak zbyt czasochłonna.

Z omawianej definicji obiektu wynika także, że sporo pikseli na obrzeżach obrazu przedmiotu (takich które nie mają jasności większej od zadanego progu) do zbioru tworzącego obiekt nie jest zaliczanych. Korekcja tego błędu możliwa jest po

zastosowaniu metod aproksymacji funkcji profilu (3.11), odzwierciedlającej spadek jasności pikseli obrazu gwiazdy przy zbliżaniu się do jego krawędzi.

Za zbiór pikseli tworzący obiekt należy przyjąć te piksele, które leżą w punktach, w których wartość funkcji profilu jest większa od ustalonej, bliskiej zeru wartości.. Brak szybkich metod wyznaczania parametrów tej funkcji (dwu zmiennych) czyni jednak pomysł ten nieużytecznym. A zatem pozostaje przyjęcie wprowadzonej już (3.6) definicji obiektu. Dodatkowym argumentem za tym, jest istnienie szybkiego algorytmu wyszukiwania pikseli obiektu, oraz fakt iż autorowi udało się stworzyć bardzo efektywną jego implementację (rozdział 5.x).

4.2.2.2.b. Dyskusja sposobu definiowania wektora cech obiektu drugiego etapu.

Następnym problemem jest odpowiednie określenie cech wydzielonych obiektów. Cechy te posłużą do wyznaczenia położenia obiektów, potem zaś teleskopu, zatem z konieczności muszą zawierać w sobie współrzędne obiektu na płaszczyźnie obrazu. Podany sposób określania tych współrzędnych (wzór 3.15)

$$x = 1/L \sum_{u \in b} l(u_{i,j}) i ,$$

$$y = 1/L \sum_{u \in b} l(u_{i,j}) j .$$

(oznaczenia jak w 3.8)

jako średnich ważonych współrzędnych pikseli obiektów jest nieskomplikowany i szybki, oraz jak pokazano w 3.2.2.1 wystarczająco dokładny.

Poza położeniem, obiekty (obrazy gwiazd) charakteryzują się innymi cechami, które mogą być pomocne w ich identyfikacji. Mogą to być następujące własności obiektów:

1. Kształt obiektów.

Kształt obiektów drugiego etapu, jako obrazów gwiazd opisać można funkcją Moffata (3.11):

$$J(x, y) = C(1 + r^2 / R^2)^{-\beta}$$

gdzie: $e_p = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$

Jednak dla wszystkich gwiazd jednego obrazu parametry R, β są prawie identyczne [39] (opisują bowiem prawie jednakowe dla wszystkich gwiazd wpływy *seeingu* i wad optyki), kształt obiektów jest więc też podobny. Jedynym bazującym na funkcji profilu Moffata wyróżnikiem obiektów (naturalnie poza współrzędnymi środka x_0, y_0), może więc być tylko parametr C , określający ich jasność.

2. Jasność obiektu.

Jasność obiektu można dokładnie wyznaczyć dopasowując do obrazu obiektu funkcję profilu (jest to podstawą współcześnie rozwijanych metod fotometrycznych opartych o analizę obrazów [39]). Jak zostało już nieco wyżej powiedziane, aproksymacja ta jest jednak uciążliwa obliczeniowo. Pozostaje zatem użycie przyjętej już (definicja 3.8) metody liczenia jasności obiektu poprzez zsumowanie jasności wszystkich należących do niego pikseli.

3. Ilość pikseli składających się na obiekt.

Sposób obliczania tego parametru wynika wprost z przyjętej definicji obiektu. Parametr umożliwia wyznaczenie średniej jasności obiektu.

4. Średnia jasność obiektu.

Jest to iloraz jasności i ilości pikseli składowych obiektu.

Umożliwia łatwą identyfikację obiektów, gdy są nimi tzw. obiekty rozciągle (głównie mgławice i galaktyki).

5. Parametry statystyczne rozkładu jasności pikseli w obiekcie.

Obok wprowadzonej już średniej jasności obiektu, za cechy obiektu można też przyjąć minimalną i maksymalną jasność pikseli, wariancję jasności, oraz momenty wyższych rzędów rozkładu jasności.

Jak zostało już powiedziane, funkcje profilu gwiazd jednego obrazu różnią się między sobą tylko parametrem C , określającym jasność obiektu. Zatem wymienione parametry statystyczne, jako zależne tylko od jasności gwiazdy, nie wnoszą żadnych dodatkowych o niej informacji.

Jednak dla obiektów rozciąglonych, których nie można opisać prostą funkcją profilu Moffata, wariancja rozkładu jasności pikseli obiektu stanowić może miarę wielkości obiektu na płaszczyźnie obrazu. Informację o wielkości obiektu niesie również wprowadzony już parametr - ilość pikseli składających się na obiekt. Wprowadzenie wariancji rozkładu jasności jako cechy obiektu jest więc mało przydatne, tym bardziej, iż z jej obliczeniem wiąże się konieczność wykonania pewnej ilości czasochłonnych działań na liczbach rzeczywistych.

6. Parametry związane z cechami spektralnymi obiektów.

Zróżnicowanie typów widmowych gwiazd [22] daje duże możliwości identyfikacji obiektów na obrazie. Opisuując piksele obrazu (obiekty pierwszego etapu) wektorami:

$$\mathbf{b}' = (i, j, l_1, l_2, \dots, l_s)$$

gdzie: i, j - współrzędne piksela (analogicznie jak w 4.1);

$l_1, l_2, \dots, l_s$ - jasności piksela w przedziałach $w_1, w_2, \dots, w_s$ widma promieniowania elektromagnetycznego;

s - liczba rozpatrywanych przedziałów widma promieniowania;

można gwiazdę (obiekt drugiego etapu), w każdym z przedziałów widma, opisać zdefiniowanymi w obecnym podrozdziale cechami (punkty 1-5). W szczególności, obliczając w każdym z przedziałów jasność obiektu, (suma jasności pikseli) można wyznaczyć jej udział w sumarycznej jasności obiektu:

$$\xi_i = \frac{l_i}{\sum_{k=1}^s l_k} \quad (4.2)$$

Wartości parametrów ξ_i są w wysokim stopniu niewrażliwe na zakłócenia spowodowane *seeing*'iem, rozogniskowaniem optyki, oraz zmianami wzmocnienia w torach pomiarowych aparatury.

Wykorzystanie powyższych cech obiektów wiąże się jednak z koniecznością zastosowania przetworników obrazowych wrażliwych na długość fali promieniowania. Niestety, barwne kamery CCD mają zbyt małą czułość; pozostaje więc użycie kamer czarno-białych wyposażonych w zestaw odpowiednich filtrów, przepuszczających światło w określonych przedziałach widma. W przypadku tym, ekspozycje z użyciem kolejnych filtrów odbywać się muszą w kolejnych chwilach czasu, w których wpływ zakłóceń spowodowanych *seeing*'iem jest odmienny. Przy obliczaniu stosunków ξ_i nie zachodzi zatem zjawisko redukcji błędów. Dodatkową wadą wielokrotnej ekspozycji w różnych rodzajach filtrów jest wydłużenie całkowitego czasu uzyskania obrazu. Czas ten może przekroczyć maksymalny okres próbkowania T_p , przy którym regulator spełnia narzucone kryteria jakości (tabela 2.1).

Spośród zaproponowanych w powyższym zestawieniu cech obiektu, należy wybrać te własności, które pozwalają na identyfikację obiektów, jednocześnie nie wymagając nadmiernego czasu obliczeń przy ich wyznaczeniu. Korzystając z uwag zawartych w poszczególnych punktach można wyłonić następujący zestaw cech obiektu:

- współrzędne środka obrazu obiektu
- jasność obiektu.
- ilość pikseli składających się na obiekt.
- średnia jasność obiektu.

Trzy ostatnie cechy są wzajemnie zależne (średnia jasność obiektu jest liczona jako iloraz jasności oraz ilości pikseli). Jedną z nich należy zatem odrzucić. Odrzucając średnią jasność obiektu unika się czasochłonnych operacji dzielenia.

Ostatecznie dostaje się znaną już postać wektora cech obiektu (wzór (3.7), z modyfikacją zmierzającą do zwiększenia dokładności wyznaczenia parametrów x, y wprowadzoną wzorem (3.15)):

$$\mathbf{b} = (x, y, n, l).$$

4.2.2.3. Procesy trzeciego etapu.

4.2.2.3.a. Definicja obiektu trzeciego etapu.

Przez analogię do poprzedniego etapu, obiekty trzeciego etapu powinny być definiowane jako pewne struktury nadrzędne w stosunku do obiektów etapów wcześniejszych. W skład jednego obiektu wchodziłyby na przykład zbiory obiektów drugiego etapu o podobnych cechach (np blisko siebie położone). Cechami obiektów trzeciego etapu mogłyby być wybrane parametry skupień obiektów drugiego etapu [18]. Ilość gwiazd na obrazie dostarczonym przez kamerę używaną do prowadzenia teleskopu przeważnie nie przekracza dziesięciu, tak więc analiza skupień nie daje istotnych informacji. A zatem wprowadzanie dodatkowej hierarchii jest zbyteczne.

Trzeci etap może być już zatem etapem końcowym. Obiektem trzeciego etapu może być wprost cały obraz. Zadanie ostatniego etapu sprowadza się do wyznaczenia wektora cech opisujących obiekt, czyli wektora globalnych cech opisujących cały obraz.

4.2.2.3.b. Poszukiwanie najbardziej istotnych składowych wektora cech obrazu.

Tworzone cechy obrazu (obektu trzeciego etapu) mogą być funkcjami wielkości należących do dowolnych zdefiniowanych przestrzeni. Poszukiwanie najbardziej użytecznych cech przeprowadzone będzie przez kolejny, systematyczny przegląd wszystkich przestrzeni. Przeglądowi towarzyszyć będzie omówienie potencjalnych możliwości, jakie niesie uwzględnienie rozpatrywanych cech w wektorze cech opisujących cały obraz.

1. Przestrzeń zjawisk Z .

Nie jest oczywiście wprost osiągalna dla algorytmów przetwarzania informacji w systemie.

2. Przestrzeń obiektów pierwszego etapu B_1 .

Podobnie jak w 1.

3. Przestrzeń wektorów cech obiektów pierwszego etapu C_1 .

Wartości współrzędnych wektora opisującego pojedynczy piksel nie wnoszą żadnych istotnych informacji o całym obrazie.

4. Przestrzeń zbiorów obiektów pierwszego etapu S_1

Podobnie jak w 1.

5. Przestrzeń zbiorów wektorów cech obiektów pierwszego etapu O_1 . (przestrzeń obrazów pierwszego etapu)

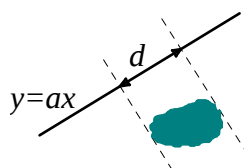
Na podstawie elementów tej przestrzeni można określić szereg globalnych własności obrazu. Przeważnie są to statystyczne parametry zbioru wektorów opisujących piksele:

- wariancja jasności,
- funkcja histogramu,
- maksymalna i minimalna jasność pikseli.

Analiza tych cech umożliwia w krańcowych przypadkach łatwą (bez analizy obiektów drugiego etapu) kontrolę ilości gwiazd na obrazie nieba. Na przykład wartość maksymalnej jasności piksela może wskazać na brak jakiegokolwiek gwiazdy (częsta sytuacja zasłonięcia nieba przez chmury).

6. Przestrzeń obiektów drugiego etapu B_2 .

Pojedynczy obiekt drugiego etapu (obraz gwiazdy) może wносить istotne informacje o obrazie gdy jest on dominującym wśród innych, względnie jedynym obiektem. Obiekt drugiego etapu jest zbiorem wektorów pikseli, można więc w razie potrzeby wyznaczyć takie cechy, które nie są współrzędnymi standardowego wektora jego cech. Na przykład, w rzadkich przypadkach obraz nieba zawiera dominującą podwójną gwiazdę o bliskich składnikach. Zlewające się obrazy gwiazd tworzą jeden obiekt, który można identyfikować obliczając dodatkową jego cechę - wydłużenie. Wydłużenie można ilościowo wyrazić poprzez obliczanie długości d odcinka będącego rzutem obrazu obiektu na prostą ($y=ax$) o zadanym kierunku⁸.(rysunek 4.3)



⁸Jest to tzw. średnica Fereta

Rysunek 4.3.

Wydłużenie ρ definiuje się następująco:

$$\rho = \frac{\max_{a \in \mathbf{R}} d(a)}{\min_{a \in \mathbf{R}} d(a)} \quad (4.3)$$

(wielkość d jest dla ustalonego obiektu funkcją wielkości a).

Ilość pikseli tworzących obiekt nie przekracza zwykle stu, zatem obliczenie wielkości d w zadanym kierunku jest bardzo szybkie. Obliczając tę wielkość dla kilku wybranych kierunków można szybko oszacować wartość wydłużenia ρ .

7. Przestrzeń wektorów obiektów drugiego etapu C_2 .

Sytuacje, gdy pojedynczy obiekt może dawać istotne informacje o obrazie zostały opisane w poprzednim punkcie. Teraz jednak dysponuje się wyłącznie jego standardowym zestawem cech. Na wykorzystaniu położenia obiektu na obrazie (pierwszych dwu współrzędnych wektora jego cech) opierała się opisana w podrozdziale 3.2 prosta metoda prowadzenia teleskopu, która okazała się zawodna.

8. Przestrzeń zbiorów obiektów drugiego etapu S_2 .

W przypadku tym można wykorzystać wszystkie obiekty jako zbiory wektorów pikseli. Dają się wyznaczyć ogólne, najczęściej statystyczne cechy pikseli tworzących obiekty.

Można określić:

- wariancję jasności pikseli wchodzących w skład obiektów (wszystkich lub wybranych);
- funkcje histogramu dla wybranych obiektów lub zbiorów obiektów;
- maksymalne i minimalne jasności pikseli w obiektach;
- cechy związane z kształtem obiektów.

W większości, cechy te nie dostarczają istotnych informacji w prowadzeniu teleskopu.

Analiza kształtu obiektów, może jednak doprowadzić do rozpoznania pewnych sytuacji awaryjnych. Jak zostało już powiedziane, (podrozdział 4.2.2.2.b.- dyskusja sposobu definiowania wektora cech obiektu drugiego etapu, punkt 1) kształt obiektów drugiego etapu (opisywany funkcją Moffata) jest dla jednego obrazu identyczny. Jednak w przypadku wystąpienia ruchów teleskopu może wystąpić pewne wydłużenie kształtu gwiazd spowodowane poruszeniem obrazu w czasie

ekspozycji. Wielkość .wydłużenia ρ (punkt 6) obrazu gwiazdy, oraz kierunek $tg(a)$, w którym rzut obrazu gwiazdy jest największy, są miarą charakteryzującą ruch teleskopu w czasie ekspozycji. Średnie wartości powyższych parametrów, obliczone dla m najjaśniejszych gwiazd na obrazie, mogą zatem być przydatne w kontroli działania układu prowadzenia. Wielkości te można zdefiniować następująco:

$$\bar{\rho} = 1/m \sum_{i=1}^m \frac{\max_{a \in \mathbf{R}} d_i(a)}{\min_{a \in \mathbf{R}} d_i(a)} \quad (4.4)$$

$$\overline{tg} = 1/m \sum_{i=1}^m tg_i \quad (4.5)$$

gdzie:

$d_i(a)$ - długość rzutu i -tego obiektu na prostą $y=ax$;

$tg_i = tg(a')$ - kierunek prostej $y=a'x$, na którą długość rzutu $d_i(a')$ i -tego obiektu osiąga wartość maksymalną

9. Przestrzeń zbiorów wektorów obiektów drugiego etapu $\mathbf{O}_2$.
(przestrzeń obrazów drugiego etapu).

Poprzez wektory cech obiektów dostępna jest zwięzła o nich informacja. Można zatem efektywnie ustalać różne typy relacji między obiektami. Najprostsze a jednocześnie najbardziej istotne w określaniu położenia teleskopu relacje między obiektami dotyczą związków pomiędzy współrzędnymi ich środków. Dla każdego obiektu $\mathbf{b}$ można utworzyć rodzinę $\mathbf{Rw}$ wektorów $\mathbf{r}$ zdefiniowaną jako zbiór:

$$\mathbf{Rw}(\mathbf{b}) = \{ \mathbf{r} = (r_1, r_2) \in \mathbf{R}^2: r_1 = b_1 - b_1', r_2 = b_2 - b_2'; \mathbf{b}' = (b_1', b_2') \in \mathbf{O}_2, \mathbf{b} = (b_1, b_2) \in \mathbf{O}_2 \} \quad (4.6)$$

Należą do niego wszystkie wektory będące różnicą w położeniu obiektu $\mathbf{b} \in \mathbf{O}_2$, oraz wszystkich pozostałych obiektów obrazu.
W zbiorze

$$\mathbf{R}_b = \{ \mathbf{Rw}(\mathbf{b}) : \mathbf{b} \in \mathbf{O}_2 \} \quad (4.7)$$

zawarta jest (nawet nadmiarowa) informacja o wzajemnych położeniach między wszystkimi obiektami obrazu. Zbiór ten można przejrzysto przedstawić w postaci macierzy $\mathbf{F}$ takiej, że:

$$\mathbf{F}_{i,j} = r_{i,j},$$

gdzie: $r_{i,j}$ - wektor (może być traktowany jak liczba zespolona) równy przesunięciu j -tego obiektu w stosunku do obiektu i -tego (w zbiorze obiektów, można wprowadzić indeksację elementów zgodną z ich jasnością).

Macierz $\mathbf{F}$ jest cechą obrazu, umożliwiającą rozstrzygnięcie, czy na obrazie występuje grupa obiektów o zadanych wzajemnych położeniach. Macierz tę można przekształcać do postaci, dających bardziej zwięzłą informację. Najprostsze przekształcenia polegają na obliczeniu elementów macierzy $\mathbf{G}$ takiej, że:

$$\mathbf{G}_{i,j} = \arg(\mathbf{F}_{i,j})$$

oraz macierzy $\mathbf{H}$:

$$\mathbf{H}_{i,j} = |\mathbf{F}_{i,j}|.$$

Dostaje się w rezultacie informacje o kątach oraz odległościach pomiędzy obiektami na płaszczyźnie obrazu. Wymiar opisanych macierzy można łatwo zmniejszyć odrzucając na przykład obiekty o najmniejszej jasności (o większej wartości indeksów).

Zbiór wektorów obiektów (drugiego etapu) umożliwia także wyznaczenie zestawu globalnych cech obrazu. Najważniejszymi z nich są:

- ilość obiektów
- średnia jasność obiektów,
- średnia różnica jasności pomiędzy obiektami a poziomem tłem (wielkość l_{gr}),
- średnia wielkość obiektów,

Zaprezentowane powyżej zestawienie powinno doprowadzić do wyłonienia cech obrazu. Ich wybór, pomimo przedstawionych wskazówek, nie jest jednak jednoznaczny. Zatem, dopiero spełnienie przez powstały układ regulacji kryteriów jakości może potwierdzić jego trafność.

Jako cechy obrazu (współrzędne wektora go opisującego) wybrano następujące wielkości:

1. zbiór $\mathbf{o}^2$ wektorów opisujących obiekty drugiego etapu (punkt 9)
2. $\bar{\rho}$ - wielkość średniego wydłużenia obrazu gwiazd (4.4),

Wektor cech $\mathbf{o}_3$ obrazu trzeciego etapu można zatem zapisać następująco:

$$\mathbf{o}^3 = (\mathbf{o}^2, \bar{\rho}) \in \mathbf{O}_3. \quad (4.8)$$

Pierwsza współrzędna wektora cech obrazu dostarcza zwięzłych i dokładnych informacji o położeniu obiektów. Druga współrzędna - $\bar{\rho}$ umożliwia w wielu przypadkach detekcję sytuacji związanych z niewłaściwym prowadzeniem, polegających na zmianie położenia teleskopu w czasie ekspozycji obrazu (czyli również w czasie obserwacji).

4.2.3. Wprowadzenie miary porównującej obrazy.

Pierwsza współrzędna wektora cech obrazu należy do przestrzeni $\mathbf{O}_2$, natomiast druga do zbioru liczb rzeczywistych. Metrykę porównującą obrazy należałoby zatem zdefiniować w sumie prostej owych przestrzeni. Niestety, opis problemu staje się wówczas mało czytelny. Wygodnym wyjściem jest zdefiniowanie wypadkowej metryki skalarnej, na przykład jako sumy ważonej metryk określonych w poszczególnych przestrzeniach. Zagadnienie sprowadza się zatem do definicji metryk w odpowiednich przestrzeniach i do określenia ich względnych udziałów w metryce zagregowanej.

4.2.3.1. Wprowadzenie miary porównującej obrazy w przestrzeni $\mathbf{O}_2$.

Zgodnie z zaproponowanym określeniem klas obrazów, do pierwszej klasy mają należeć obrazy podobne (ewentualnie po uwzględnieniu przesunięć) do obrazu zadanego. Jako pierwsze przybliżenie postaci funkcji metryki naturalne jest zatem przyjęcie sumy odległości pomiędzy odpowiadającymi sobie obiektami (drugiego etapu) obrazów. Nadając każdemu obiektowi (wektorowi cech) indeks numerujący go w obrazie, funkcję tę można wyrazić wzorem:

$$m(\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2) = \sum_{i \in I_1} d'(\mathbf{b}_{1i}, \mathbf{b}_{2j}) \quad (4.9)$$

gdzie:

I_1 - zbiór indeksów obiektów obrazu $\mathbf{o}_1$,

$(\mathbf{b}_{1i}, \mathbf{b}_{2j})$ - para wektorów cech obiektów należących odpowiednio do obrazu $\mathbf{o}_1$ oraz $\mathbf{o}_2$, tak dobrana, że:

$$\forall i \in I_1: d'(\mathbf{b}_{1i}, \mathbf{b}_{2j}) = \min_{k \in I_2} d(\mathbf{b}_{1i}, \mathbf{b}_{2k})$$

I_2 - zbiór indeksów obiektów obrazu $\mathbf{o}_2$,

d - metryka określona w przestrzeni wektorów cech obiektów drugiego etapu następująco:

$$d(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| + e|n_1 - n_2| + f|l_1 - l_2|; \quad (4.10)$$

gdzie:

$\mathbf{b}_i = (x_i, y_i, n_i, l_i) \in C_2, i \in \{1, 2\}$ - wektory cech obiektów,

e, f - doświadczalnie wybrane dodatnie współczynniki.

Wprowadzoną metrykę (4.9) należy zmodyfikować w ten sposób by wartość jej nie była zależna od translacji wszystkich obiektów na obrazie. Definicja:

$$m'(\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2) = \min_{\mathbf{p} \in T} m(\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_{2p}) \quad (4.11)$$

gdzie: $\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2, \mathbf{o}_{2p} \in O_2$,

$\mathbf{o}_{2p}$ - obraz, w którym współrzędne środków wszystkich obiektów zostały przesunięte o pewien wektor $\mathbf{p} \in \mathbf{R}^2$, w stosunku do obrazu $\mathbf{o}_2$;

$T \subset \mathbf{R}^2$ - zbiór wszystkich możliwych przesunięć $\mathbf{p}$;

podaje funkcję spełniającą ten warunek. Funkcja ta ma jednak poważną wadę. Wprawdzie zeruje się, gdy obrazy sobie dokładnie odpowiadają (lub są przesunięte o wektor), ale w sytuacji gdy pewne obiekty obrazów nie odpowiadają sobie, wartością funkcji staje się różnica między nimi. W przypadku tym funkcja odległości między obrazami wyraża się w przypadkowych wartościach odległości między nie odpowiadającymi sobie obiektami. Każde niedopasowanie się obiektów powinno być oceniane nie odległością obiektów, lecz pewną ustaloną miarą zależną od znaczenia obiektów. Postulat ten spełnia funkcja:

$$g(\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2) = 1 / Sw_2 \sum_{i \in I_2} w_{2i} \delta(\mathbf{o}_1, \mathbf{b}_{2i}) \quad (4.12)$$

gdzie: $\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2 \in \mathbf{O}_2$ - obrazy,

Sw_2 - suma wag wszystkich obiektów obrazu $\mathbf{o}_2$,

I_2 - zbiór indeksów obiektów w obrazie $\mathbf{o}_2$,

w_2 - waga i -tego obiektu obrazu $\mathbf{o}_2$,

zaś:

$$\delta(\mathbf{o}_1, \mathbf{b}_{2i}) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \exists \mathbf{b}_{1k} \in \mathbf{o}_1 : d(\mathbf{b}_{1k}, \mathbf{b}_{2i}) \leq r \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (4.13)$$

gdzie: $\mathbf{b}_{2i}$ - i -ty obiekt w obrazie $\mathbf{o}_2$,

$\mathbf{b}_{1k}$ - k -ty obiekt w obrazie $\mathbf{o}_1$,

r - pewna wybrana liczba.

(funkcja δ jest równa 1 gdy istnieje obiekt $\mathbf{b}_{1k}$ w obrazie $\mathbf{o}_1$ taki, że: $d(\mathbf{b}_{1k}, \mathbf{b}_{2i}) \leq r$)

Wartość funkcji $g(\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2) \in \langle 0, 1 \rangle$ można uważać za miarę zgodności pewnego obrazu $\mathbf{o}_2$ z obrazem $\mathbf{o}_1$.

Porównując własności funkcji g z postulatami metryki [7] określonej w przestrzeni $\mathbf{X}$ otrzymuje się:

aksjomaty metryki

własności funkcji g

1a. $\forall x, y \in \mathbf{X}: d(x, y) \geq 0$

1a. $\forall x, y \in \mathbf{O}_2: g(x, y) \geq 0$

1b. $\forall x, y \in \mathbf{X}: x = y \Leftrightarrow d(x, y) = 0$

1b. $\forall x, y \in \mathbf{O}_2: x = y \Rightarrow g(x, y) = 1$

1c. $\forall x, y \in \mathbf{O}_2: x \neq y \Rightarrow g(x, y) \leq 1$

2. $\forall x, y \in \mathbf{X}: d(x, y) = d(y, x)$

3. $\forall x, y, z \in \mathbf{X}: d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$

Przekształcenie g nie spełnia nierówności trójkąta oraz nie jest przemienne. Nie można więc mówić o określonej przez nie odległości między obrazami. Jednakże własność 1c oraz własność 1b (dualna do aksjomatu 1b metryki) pozwalają na wprowadzenie pojęcia otoczenia punktu. Ono zaś posłużyć może w definicji klas obrazów. Otoczenie punktu $\mathbf{o}_b$ (obrazu $\mathbf{o}_b$) może być definiowane jako zbiór obrazów $\mathbf{o}$ dla których:

$$g(\mathbf{o}_b, \mathbf{o}) \geq g_{gr} ; \quad (4.14)$$

gdzie: $\mathbf{o}, \mathbf{o}_b \in \mathbf{O}_2$,

$g_{gr} \in <0,1>$ - wybrana wartość graniczna.

Według założenia 1 punktu 4.1 do jednej klasy obrazów $\mathbf{K}_1$ mają należeć obrazy wzajemnie przesunięte. Można to osiągnąć poprzez modyfikację funkcji g : (która użyta została także w 4.11). Nowa funkcja p_1 ma postać:

$$p_1(\mathbf{o}_w, \mathbf{o}_a) = \max_{\mathbf{p} \in \mathbf{T}} g(\mathbf{o}_w, \mathbf{o}_{ap}) \quad (4.15)$$

gdzie: $\mathbf{o}_w, \mathbf{o}_a, \mathbf{o}_{ap} \in \mathbf{O}_2$,

$\mathbf{o}_{ap}$ - obraz, w którym współrzędne środków wszystkich obiektów zostały przesunięte o pewną wartość $\mathbf{p} \in \mathbf{R}^2$, w stosunku do obrazu $\mathbf{o}_a$,

$\mathbf{T} - \mathbf{T} \subset \mathbf{R}^2$, zbiór wszystkich możliwych przesunięć $\mathbf{p}$.

Zdefiniowaną funkcję p_1 można określać mianem funkcji podobieństwa w przestrzeni obrazów drugiego etapu.

4.2.3.2. Wprowadzenie ogólnej miary porównującej obrazy.

Funkcję p_1 należy raz jeszcze uogólnić. Zgodnie z uwagami zawartymi w podrozdziale 4.2.3, pojęcie metryki powinno być zdefiniowane jako suma metryk określonych w wybranych przestrzeniach. Postulat ten powinien być przeniesiony również na funkcje podobieństwa. Uwzględniając jednak fakt, iż zdefiniowane podobieństwo jest funkcją o wartościach z przedziału $<0,1>$, oraz fakt że wartość ta maleje wraz ze wzrostem różnic między obrazami (odwrotnie niż w przypadku metryki), uogólnione podobieństwo można zdefiniować poprzez iloczyn funkcji podobieństw określonych w odpowiednich przestrzeniach. A zatem:

$$p_g(\mathbf{o}_1^3, \mathbf{o}_2^3) = p_1(\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2) \cdot p_2(\bar{\mathbf{p}}_1, \bar{\mathbf{p}}_2) \quad (4.16)$$

gdzie:

$\mathbf{o}_1^3, \mathbf{o}_2^3 \in \mathbf{O}_3$ - obrazy trzeciego etapu;

$\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2 \in \mathbf{O}_2$ - obrazy drugiego etapu odpowiadające obrazom $\mathbf{o}_1^3, \mathbf{o}_2^3$;

$\bar{\mathbf{p}}_1, \bar{\mathbf{p}}_2 \in \mathbf{R}$ - wielkości średniego wydłużenia gwiazd obrazów odpowiadających obrazom $\mathbf{o}_1^3, \mathbf{o}_2^3$;

$p_2: \mathbf{R}^2 \rightarrow \langle 0,1 \rangle$ - wprowadzona w $\mathbf{R}^2$ funkcje podobieństwa
(zdefiniowane niżej).

Powyższa konstrukcja globalnej funkcji podobieństwa sprawia, iż jej wartości nadal należą do przedziału $\langle 0,1 \rangle$. Wpływ wszystkich składowych funkcji podobieństwa jest jednak identyczny. Chcąc zapewnić różny udział składowych funkcji podobieństw w wartości globalnej (podrozdział 4.2.3) można posłużyć się następującą modyfikacją wyrażenia (4.16):

$$p_g(\mathbf{o}_1^3, \mathbf{o}_2^3) = (p_1(\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2))^{\gamma_1} \cdot (p_2(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2))^{\gamma_2} \quad (4.17)$$

gdzie: $\gamma_1, \gamma_2 \in \langle 0,1 \rangle$ - parametry ustalające wpływ składowych funkcji podobieństw na globalną funkcję podobieństwa p_g .

Jednak prostszym sposobem zróżnicowania wpływu składowych na wartość wyrażenia (4.16) jest odpowiednia konstrukcja funkcji p_2 . Funkcja ta, jako funkcja podobieństwa, ma mieć wartość jeden, dla identycznych argumentów, oraz wartość ta ma zmierzać do zera przy wzroście różnic między argumentami. Funkcję o powyższych własnościach można w prosty sposób zdefiniować jako sklejenie funkcji liniowych, pewnych wielomianów, lub jako funkcje wymierne np:

$$f(x, y) = \frac{1}{1 + (x - y)^2 / M^2} ; \text{ gdzie: } M \in \mathbf{R}. \quad (4.18)$$

Zgodnie z ustaleniami (koniec podrozdziału 4.2.2.3.b), cecha obrazu $\bar{\rho}$ ma być pomocna w detekcji stanu niewłaściwego prowadzenia teleskopu. Dlatego też, funkcja podobieństwa $p_2(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2)$ powinna generować tylko dwie wartości: zero gdy nastąpiło przesunięcie teleskopu w czasie ekspozycji (nastąpiła znacząca zmiana parametru wydłużenia $\bar{\rho}$ obrazów gwiazd), oraz jeden, gdy przesunięcia tego nie było.

Funkcję $p_2(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2)$ można więc zdefiniować funkcją skokową:

$$p_2(\rho_1, \rho_2) = \begin{cases} 1 & \text{gdyn} |\rho_1 - \rho_2| < \Delta\rho, \\ 0 & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases} \quad (4.19)$$

Parametr $\Delta\rho$ wyznaczając obszar niezerowania się funkcji p_2 , określa jednocześnie jej wpływ na wartość globalnej funkcji podobieństwa p_g (zwiększanie $\Delta\rho$ zmniejsza ten wpływ). Wartość $\Delta\rho$ wyznacza się eksperymentalnie.

Podsumowując, globalna funkcja podobieństwa $p_g(\mathbf{o}_1^3, \mathbf{o}_2^3)$ między obrazami zdefiniowana jest wyrażeniem (4.16), czyli:

$$p_g(\mathbf{o}_1^3, \mathbf{o}_2^3) = p_1(\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2) \cdot p_2(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2)$$

gdzie: $p_1(\mathbf{o}_1, \mathbf{o}_2)$ - funkcja zdefiniowana zależnością (4.15);

$$p_2(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2) - \text{funkcja zdefiniowana zależnością (4.19)} \quad (4.20))$$

(pozostałe oznaczenia jak 4.16).

4.3. Ustalenie algorytmu działania układu prowadzenia teleskopu.

Zgodnie z uwagami przedstawionymi w podrozdziale 4.1, konsekwencją zaklasyfikowania obrazu do jednej z klas K_1 , K_2 , K_3 powinno być wywołanie odpowiedniego, właściwego dla danej klasy algorytmu regulacji. Przedmiotem następnych podrozdziałów będzie dokładna definicja klas, oraz odpowiadających im algorytmów sterowania.

4.3.1. Definicja klasy K_1 , oraz algorytmu sterowania z nią związanego.

4.3.1.1. Definicja klasy K_1 .

W zaproponowanym w punkcie 4.1 podziale przestrzeni obrazów na trzy klasy zakłada się, że pierwsza klasa zawiera obrazy podobne do obrazu zadanego. Klasę tę wyznacza się tylko na podstawie jednego obrazu. Naturalne jest zatem potraktowanie obrazu zadanego jako obrazu wzorcowego definiującego klasę. W oparciu o funkcję podobieństwa zdefiniować można pojęcie otoczenia kulistego ustalonego obrazu $\mathbf{o}_w$ (analogicznie jak dla funkcji g ; definicja 4.14). Będzie ono rozumiane jako zbiór obrazów $\mathbf{o}_b$ dla których:

$$p_g(\mathbf{o}_w, \mathbf{o}_b) \geq p_{gr} \quad (4.21)$$

gdzie: $p_{gr} \in (0,1)$ - wybrana wartość graniczna.

Otoczenie obrazu zadanego $\mathbf{o}_w$ wyznacza zatem pierwszą klasę obrazów (K_1).

4.3.1.2. Algorytm sterowania związany z klasą K_1 .

W ogólnym przypadku (rysunek 4.1) algorytm wywoływany po zaklasyfikowaniu obrazu do pewnej klasy, aby obliczyć sterowanie u , musi raz jeszcze zanalizować obraz zmierzając do wyznaczenia położenia teleskopu. Jednak w zaproponowanej metodzie klasyfikacji obrazów położenie teleskopu jest wiarygodnie wyznaczane już podczas samej klasyfikacji. Jest ono wyznaczone przez wektor $\mathbf{p}$ maksymalizujący wyrażenie (4.15). Wektor $\mathbf{p}=(p_x, p_y)$ będący przesunięciem między obrazem aktualnym i wzorcowym, jest wartością błędu prowadzenia wyrażoną w układzie współrzędnych związanym z kamerą. Sygnał wejściowy $\mathbf{e}=(e_\phi, e_\psi)$, nieliniowego

regulatora opisanego w rozdziale 2 jest natomiast określony w sferycznym układzie współrzędnych związanym z zawieszeniem teleskopu (regulator pracując niezależnie w obu współrzędnych e_φ, e_ψ musi posiadać dwa odseparowane kanały).

Dla niewielkich wartościach wektorów błędów prowadzenia jest możliwa prosta ich konwersja pomiędzy układami współrzędnych.

Odpowiada jej następujące liniowe przekształcenie:

$$\mathbf{e} = \mathbf{U} \mathbf{p} ; \quad (4.22)$$

gdzie: $\mathbf{U}$ - macierz rzeczywista o wymiarach 2×2 .

Wartości wyrazów macierzy $\mathbf{U}$ muszą uwzględniać obrót i przeskalowanie obu układów współrzędnych. Praktycznie oznacza to, że macierz ta musi być wyznaczana na nowo po każdorazowej zmianie położenia teleskopu i usytuowania kamery⁹.

4.3.2. Definicja klasy $\mathbf{K}_2$, oraz algorytmu sterowania z nią związanego.

4.3.2.1. Definicja klasy $\mathbf{K}_2$.

Obrazy pobrane z kamery po wystąpieniu korygowalnych błędów w prowadzeniu teleskopu tworzą (zgodnie z punktem 4.1) pewien zbiór $\mathbf{W}$. Opierając się na wprowadzonej funkcji podobieństwa p_g (4.20) można utworzyć wokół każdego elementu tego zbioru odpowiednie otoczenie. Zbiór będący sumą tych otoczeń definiuje drugą klasę obrazów ($\mathbf{K}_2$).

Podstawową cechą obrazów zbioru $\mathbf{W}$ jest właśnie fakt, iż umożliwiają one korekcję położenia teleskopu. W tym kontekście należy przedyskutować zasadność włączenia do zbioru $\mathbf{W}$ następujących typów obrazów:

1. Obrazy powstałe po zmianie położenia teleskopu,.

Przesunięcia teleskopu prowadzą do sytuacji, w których obraz pobrany z kamery nie zawiera żadnego obiektu należącego pierwotnie do obrazu wzorcowego lub zawiera ich niepełną liczbę. Przypadki takie mogą wystąpić przy dokonaniu w trakcie obserwacji zmian ustawień przyrządów obserwacyjnych, naruszających jednocześnie ustawienie kamery (urządzenia mają najczęściej wspólne zamocowanie). Sytuacje te mogą się również zdarzyć w czasie krótkotrwałej awarii systemu kompensacji ruchu dobowego Ziemi. Często występują również niewielkie (mieszczące się w granicach obrazu) przesunięcia teleskopu związane z przypadkowym działaniem osób prowadzących obserwacje.

⁹ Poprzez pomiar przesunięć $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ odpowiadających zadawanym przesunięciom $\mathbf{e}_1=(e_\varphi,0), \mathbf{e}_2=(0,e_\psi)$, (e_φ, e_ψ - ustalone liczby), wyrażonym w sferycznym układzie współrzędnych, można łatwo wyznaczyć elementy macierzy $\mathbf{V}$, przejścia z układu sferycznego do układu współrzędnych związanego z kamerą. Macierz $\mathbf{U}$ wyznacza się następnie jako $\mathbf{V}^{-1}$.

2. Obrazy powstałe po dokonaniu obrotu podstawy zamocowania kamery.

Podobnie jak w poprzednim punkcie, obrót podstawy zamocowania kamery może być spowodowany zmianą ustawień przyrządów obserwacyjnych. Wprowadzona wzorem (4.20) funkcja podobieństwa p_g nie umożliwia identyfikacji tego typu sytuacji. Ponadto, nie instaluje się sterowalnych urządzeń wykonawczych obracających podstawą (tzw. stolikiem) przyrządów obserwacyjnych i kamery. Wprowadzenie do zbioru $\mathbf{W}$ obrazów obróconych jest więc w tej sytuacji bezużyteczne.

3. Obrazy których ekspozycji towarzyszył ruch teleskopu.

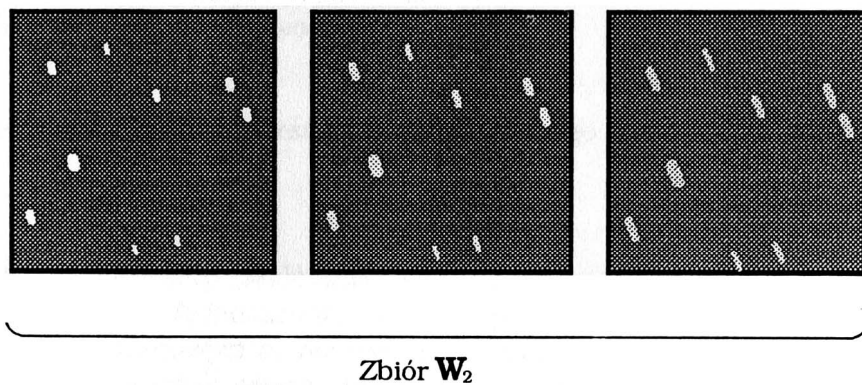
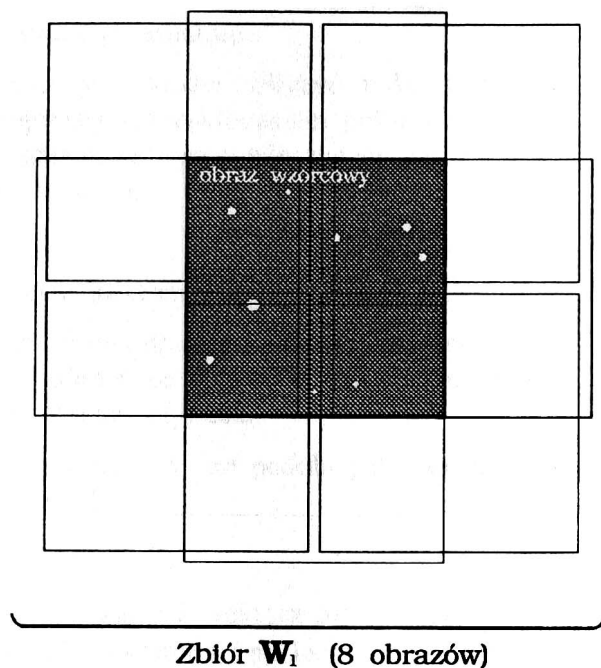
Niektóre typy zakłóceń oddziałujących na położenie teleskopu (wiatr, luzy układów mechanicznych) mogą być na tyle duże, iż prowadzą do powstania poruszonych obrazów. Obiekty (drugiego etapu) należące do tych obrazów mają pewne wydłużenie (4.3) oraz zwiększoną w stosunku do obiektów obrazu wzorcowego ilość pikseli n . Omawiane obrazy można identyfikować z pomocą funkcji podobieństwa p_g , można zatem wyznaczać na ich podstawie położenie teleskopu.

Jak wynika z powyższego zestawienia, zbiór $\mathbf{W}$ powinny tworzyć obrazy opisane w punktach 1. oraz 3. Niech $\mathbf{W}_1$ oznacza obrazy z punktu 1, natomiast $\mathbf{W}_2$ odpowiednio z punktu 2¹⁰. Rysunek 4.4 przedstawia w symbolicznej formie jeden z możliwych sposobów tworzenia zbioru $\mathbf{W} = \mathbf{W}_1 \cup \mathbf{W}_2$.

Ograniczenia pamięci użytego do analizy obrazów komputera, oraz ograniczony czas tworzenia zbioru $\mathbf{W}_1$ sprawiają, iż można się posłużyć przy jego tworzeniu tylko kilkoma obrazami pobranymi z bezpośredniego sąsiedztwa obrazu wzorcowego. Tworzeniu tych obrazów muszą towarzyszyć pewne ustalone przemieszczenia teleskopu. Przesunięcia te można łatwo uzyskać włączając na odpowiedni czas silniki sterujące położeniem teleskopu (otwarty układ sterowania). Przez odpowiednie kombinacje zwrotów napięć sterujących silnikami łatwo jest uzyskać 9 widocznych na rysunku 4.4 kierunków przesunięcia.

Podobnie, do zbioru $\mathbf{W}_2$ można włączyć tylko kilka poruszonych obrazów, odpowiadających najczęstszym zakłóceniom położenia teleskopu. Ekspozycja tych obrazów powinna przebiegać przy włączonych silnikach sterujących (przez co uzyskuje się efekt zakłócenia).

¹⁰W przypadku, w którym do tworzenia zbioru $\mathbf{W}$ użyłoby większej ilości podzbiorów $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_k$ pomocna byłaby dodatkowa formalizacja, polegająca na zdefiniowaniu podklas $\mathbf{K}_{21}, \mathbf{K}_{22}, \dots, \mathbf{K}_{2k}$ klasy $\mathbf{K}_2$.



Rysunek 4.4
Przykładowy sposób tworzenia zbiorów obrazów W_1 i W_2 .

4.3.2.2. Algorytm sterowania związany z klasą K_2 .

Zaklasyfikowanie obrazu otrzymanego z kamery do klasy K_2 , oznacza, iż obraz jest podobny do pewnego obrazu ze zbioru W_1 , lub obrazu ze zbioru W_2 . Poniżej będą rozpatrzone oba wymienione przypadki.

1. Obraz o_a otrzymany z kamery jest podobny do pewnego obrazu o_x ze zbioru W_1 , czyli (zgodnie z 4.20):

$$p_g(o_x, o_a) \geq p_{gr}$$

Wyznaczona jest więc wartość wektora $p \in R^2$ (patrz punkt 4.3.1.2) który jest przesunięciem między obrazami o_a i o_x . Jednocześnie znane jest przesunięcie $p' \in R^2$ obrazu o_x w stosunku do obrazu wzorcowego o_w .

A zatem, przesunięcie obrazu aktualnego o_a w stosunku do o_w dane jest wektorem:

$$p'' = p + p';$$

Powrót do położenia określonego obrazem wzorcowym można zrealizować w otwartym układzie regulacji, poprzez ustalenie czasu działania silników sterujących (podobnie jak przy tworzeniu zbioru W_1).

2. Obraz o_a otrzymany z kamery jest podobny do pewnego obrazu o_y ze zbioru W_2 , czyli:

$$p_g(o_y, o_a) \geq p_{gr}$$

Oznacza to, iż powstały zakłócenia, które doprowadziły do powstania poruszonych obrazów. Jednocześnie, niewielkie przesunięcie między obrazem o_y oraz obrazem wzorcowym o_w nie wymaga dodatkowej, specjalnej korekcji. Wystarczy zatem odczekać pewną chwilę czasu, aż zakłócenia zanikną (luz, wiatr). Po tym okresie, w kolejnym cyklu sterowania, obraz aktualny o_a najprawdopodobniej zostanie zaklasyfikowany do klasy K_1 , czyli niewielkie przemieszczenie teleskopu zostanie skorygowane przez algorytmy "działające" w klasie K_1 .

4.3.3. Definicja klasy K_3 , oraz algorytmu sterowania z nią związanego.

Do trzeciej klasy (K_3), powinny należeć obrazy odpowiadające sytuacjom powstania niekorygowalnych błędów prowadzenia. Klasę K_3 definiuje się zatem jako dopełnienie sumy klasy pierwszej i drugiej.

Zgodnie z założeniami (punkt 4.1) po zaklasyfikowaniu obrazu do klasy K_3 należy unieruchomić algorytmy sterowania teleskopem, oraz wywołać sygnał alarmowy.

W działającym w czasie rzeczywistym systemie sterowania teleskopem całkowity czas analizy obrazu i wyprowadzenia sygnałów sterujących nie może przekraczać wielkości T_0 (zgodnie z punktem 2.3). W przypadkach dużego nagromadzenia gwiazd na obrazie (rzędu 10) czas pełnej analizy obrazu, tzn. polegającej na badaniu jego przynależności do klas K_1 , K_2 przekracza wartość T_0 ¹¹. Najbardziej czasochłonny jest proces obliczania przynależności obrazu do klasy K_2 (obliczenie funkcji podobieństwa obrazu do kilku innych obrazów), należy zatem go przeprowadzić tylko w sytuacjach, niezaklasyfikowania obrazu do klasy K_1 . A zatem, negatywny wynik klasyfikacji obrazu do klasy K_2 , poprzedzony niezaklasyfikowaniem obrazu do K_1 , oznacza jego przynależność do klasy K_3 .

W dalszej części pracy przedstawiony będzie opis algorytmów regulacji realizujących pewne specyficzne funkcje prowadzenia teleskopu. Przedtem jednak dokonana będzie analiza jakości pracy regulatora (2.31) "działającego" w klasie obrazów K_1 .

4.4. Ocena jakości regulatora

Omawiany układ ma identyczne własności statyczne i dynamiczne jak opisany w punkcie 3.2.2. Jednak prowadzona w trakcie przetwarzania obrazów analiza struktury zbioru obiektów zmienia jego niezawodność działania. Poniżej zostanie pokazane, iż przy odpowiednim doborze parametrów układu niezawodność jego działania spełnia kryterium (2.7).

Niech w skład obrazów $\mathbf{o}_w$, $\mathbf{o}_a$ wchodzi n obiektów (gwiazd). Ponadto, niech p_{bk} oznacza prawdopodobieństwo zdarzenia:

$$p_{bk}: d(\mathbf{b}_{wk}, \mathbf{b}_{ak}) > r \quad (4.23)$$

gdzie: $\mathbf{b}_{wk}$ - k -ty obiekt w obrazie $\mathbf{o}_w$,

$\mathbf{b}_{ak}$ - k -ty obiekt w obrazie $\mathbf{o}_a$,

r - pewna wybrana liczba.

Zakładając, iż w obrazach $\mathbf{o}_w$, $\mathbf{o}_a$ wprowadzono identyczną numerację obiektów, powyższe zdarzenie polega zatem na tym, iż odległość d (4.10) pomiędzy wektorami cech tego samego obiektu na dwu obrazach przekracza liczbę r (patrz wzór 4.13)). Prawdopodobieństwo p_c zdarzenia w którym przynajmniej jeden obiekt dwu obrazów posiada powyższą własność można zatem wyrazić:

$$p_c = \sum_{\mathbf{b}_{ak} \in \mathbf{o}_a} p_{bk} \quad (4.24)$$

¹¹ Przy użyciu powszechnie dostępnego sprzętu mikrokomputerowego (punkt 5.1.2)

Jeśli powyższe zdarzenie zachodzi, obliczona na podstawie (4.15) funkcja podobieństwa $p_1(\mathbf{o}_w, \mathbf{o}_a)$ między obrazami $\mathbf{o}_w$, $\mathbf{o}_a$ ma wartość mniejszą od jedności.

Przyjmując graniczną wartość funkcji podobieństwa p_g (4.21) równą $p_{gr}=1$ oraz zakładając, iż $p_2(\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2) \equiv 1$ (4.19) (różnica wydłużeń obrazów gwiazd w $\mathbf{o}_w$ oraz $\mathbf{o}_a$ nie przekracza wartości granicznej $\Delta\rho$), prawdopodobieństwo niezaklasyfikowania obrazu $\mathbf{o}_a$ do klasy $\mathbf{K}_1$ jest równe p_c . Korzystając z wprowadzonego kryterium niezawodności (2.7), oraz uwzględniając okres próbkowania regulatora T_p , można podać warunek określający dopuszczalną wartość prawdopodobieństwa p_c następująco:

$$p_c < v_{gr} T_p. \quad (4.25)$$

Oznaczając: $p_{b\max} = \max_{\mathbf{b}_{ak} \in \mathbf{o}_a} p_{bk}$, dostaje się:

$$n p_{b\max} < v_{gr} T_p. \quad (4.26)$$

Odległość d określona jest wzorem (4.10) w sposób następujący:

$$d(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| + e|n_1 - n_2| + f|l_1 - l_2|$$

gdzie: $\mathbf{b}_i = (x_i, y_i, n_i, l_i) \in \mathbf{C}_2$, $i \in \{1, 2\}$ - wektory cech obiektów,

Przy założeniu, że różnice $r_x = x_1 - x_2$, $r_y = y_1 - y_2$ mają rozkład normalny $N[0, \sigma_{rx}](r_x)$, $N[0, \sigma_{ry}](r_y)$, oraz przyjmując: $e=f=0$, $\sigma_{rx}=\sigma_{ry}$ prawdopodobieństwo p_{bk} zdarzenia (4.23) można oszacować:

$$p_{bk} > .4 \int_{-\infty}^r N[0, \sigma_{rx}](x) dx \quad (4.27)$$

W szczególności:

$$p_{b\max} > 4 \int_{-\infty}^r N[0, \sigma_{rx_{\max}}](x) dx \quad (4.28)$$

Zestawiając powyższą zależność z (4.26) dostaje się:

$$\int_{-\infty}^r N[0, \sigma_{rx_{\max}}](x) dx < v_{gr} T_p / 4n. \quad (4.29)$$

Dla wartości $v_{gr} = 2.31 \cdot 10^{-5}$ (tabela 2.1), wartości $T_p = 0.12s$ (punkt 3.2.3.1), a także dla $\sigma_{rx_{\max}} = 0.3$ (punkt 3.2.3.1), oraz $n=15$, powyższa nierówność prowadzi do zależności:

$$r > 1.25 \quad (4.30)$$

Podsumowując dotychczasowe rozważania, należy stwierdzić iż przyjmując wartość r powyżej wartości 1.25, prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, iż globalne podobieństwo p_g między obrazami $\mathbf{o}_w$ oraz $\mathbf{o}_a$ jest mniejsze od jedności, jest równe co najwyżej wartości określonej przez kryterium niezawodności. A zatem, z odpowiednią niezawodnością system wizyjny jest w stanie klasyfikować obrazy do klasy $\mathbf{K}_1$.

Niestety, ostatni warunek nie jest warunkiem wystarczającym prawidłowego prowadzenia teleskopu. Może się bowiem zdarzyć, iż podobieństwo p_1 , definiowane zależnością (4.15)

$$p_1(\mathbf{o}_w, \mathbf{o}_a) = \max_{\mathbf{p} \in \mathbf{T}} g(\mathbf{o}_w, \mathbf{o}_{ap})$$

ma wartość jeden dla wielu różnych wartości przesunięcia między obrazami $\mathbf{p}$. Może prowadzić to do wyznaczenia błędnych wartości przesunięcia między obrazem aktualnym, oraz wzorcowym, czyli powstania błędów w prowadzeniu. Zbiór wszystkich możliwych przesunięć $\mathbf{T}$ jest ograniczony i można go utworzyć obliczając kolejno różnice w położeniu obiektów w każdej parze zestawionej z obiektów aktualnego i wzorcowego obrazu. Łatwo sprawdzić, iż jeśli

$$\forall \mathbf{b}_1 = (x_1, y_1, n_1, l_1), \mathbf{b}_2 = (x_2, y_2, n_2, l_2) \in \mathbf{o}_a: |x_1 - x_2| > r \vee |y_1 - y_2| > r ; \quad (4.31)$$

czyli odległości pomiędzy obiektami na obrazach są większe od r , tylko jeden wektor $\mathbf{p}$ maksymalizuje funkcję $g(\mathbf{o}_w, \mathbf{o}_{ap})$. Przesunięcie między obrazami jest wówczas wyznaczone prawidłowo. Sytuacje, w których odległości między obiektami są mniejsze od r zdarzają się bardzo rzadko (z prawdopodobieństwem rzędu $p_m = r^2 / (N_1 N_2) n(n-1)/2$; dla $r=1.25$, $N_1=N_2=256$, $n=10$ otrzymuje się $p_m=0.001$).

A zatem układ regulacji o przyjętych w obecnym podrozdziale parametrach **spełnia** wymagane kryterium niezawodności pracy (zależność 2.7 oraz tabela 2.1).

Przy udowodnieniu powyższego faktu, przyjęto dość sztuczne założenie, iż wartość graniczna p_{gr} funkcji podobieństwa jest równa jedności. Przy tej wartości p_{gr} , regulator położenia teleskopu działa oczywiście niezawodnie w myśl wprowadzonego kryterium. Jednakże przyjęcie innych wartości parametru p_{gr} może doprowadzić do powstania regulatora działającego równie niezawodnie w o wiele trudniejszych warunkach niż te, które powszechnie przyjmuje się w kryterium niezawodności pracy układu prowadzenia teleskopu (zależność 2.7). Łatwo zauważyć (wzór 4.15) iż na przykład w następującej sytuacji:

1. obraz wzorcowy zawiera n gwiazd, przy czym;
2. jasności gwiazd na obrazie wzorcowym są podobne, czyli wagi obiektów (wzór 4.12) można przyjąć za wzajemnie równe;

3. średnie wydłużenia: $\bar{\rho}_w, \bar{\rho}_a$ obiektów obrazu wzorcowego, oraz obiektów obrazu aktualnego są podobne, to znaczy: $p_2(\bar{\rho}_w, \bar{\rho}_a) < \Delta p$ (patrz 4.19);

4. wartość parametru $p_{gr} = 0.6$;

obraz aktualny $\mathbf{o}_a$ jest podobny (funkcja p_g) do obrazu wzorcowego $\mathbf{o}_w$ nawet wówczas, gdy w obrazie aktualnym brak jest około 40% gwiazd obrazu $\mathbf{o}_w$. Sytuacja taka może zaistnieć po wystąpieniu zakłócenia powodującego znaczne przesunięcie położenia teleskopu. Ustalony na podstawie pozostałych 60% gwiazd wektor przesunięcia $\mathbf{p}$ (4.15) pozwala jednocześnie na wyznaczenie położenia teleskopu, i jego odpowiednią korekcję. Podobne korzystne efekty występują również dla obrazów o zróżnicowanej jasności gwiazd.

Podstawowym problemem jest jednak odpowiedni dobór wartości parametrów p_{gr} i r . Zmniejszenie p_{gr} powoduje z jednej strony możliwość identyfikacji obrazu na podstawie mniejszego jego fragmentu, z drugiej jednak strony stwarza niebezpieczeństwo przypadkowego "dopasowania" się układu gwiazd obrazu aktualnego do wzorcowego. Podobnie skutki pociąga za sobą zwiększenie parametru r . Konsekwencją tego jest powstanie błędu w wyznaczeniu wartości przesunięcia między obrazami.

Do wyznaczenia optymalnej wartości parametrów p_{gr} i r można posłużyć się odpowiednią symulacją. Nietrudno jest zaprojektować taki sposób symulacji, w którym sprawdzana byłaby możliwość powstania błędu w wyznaczeniu przesunięcia między obrazami dla generowanych w odpowiedni sposób rozkładów gwiazd na obrazie. Niestety, parametry rozkładu jasności gwiazd różnią się znacznie między sobą dla różnych okolic nieba¹². Powoduje to trudności w dokładnym ustaleniu powyższych parametrów, co w konsekwencji czyni metodę symulacyjną praktycznie mało przydatną. Pozostaje zatem wyznaczenie wartości p_{gr} eksperymentalnie. W 21 sprawdzonych przez autora przypadkach obrazów zawierających od 3 do 11 gwiazd, ani razu nie doszło do błędnego wyznaczenia przesunięcia między obrazami, gdy wartość parametrów $p_{gr}=0.65, r=3$.

4.5. Opis algorytmów regulacji realizujących konkretne zadania systemu prowadzenia teleskopu.

Realizacja funkcji system prowadzenia polega na odpowiednim sterowaniu postacią obrazu zadanego $\mathbf{o}_z$ oraz zbioru obrazów pomocniczych $\mathbf{W}$ (patrz rysunek 4.1). Wizyjny regulator położenia staje się zatem układem podrzędnym którego zadanie polega na takim sterowaniu teleskopem, by obrazy otrzymywane z kamery odpowiadały obrazowi zadanemu. Cały system prowadzenia można zatem przedstawić prostą strukturą z układem zadającym obrazy, bazą danych zawierającą obrazy ze zbioru $\mathbf{W}$ i obraz $\mathbf{o}_z$, oraz z regulatorem obrazów. Strukturę tę ilustruje rysunek 4.5. Poniżej zostaną przedstawione sposoby działania układu nadrzędnego

¹²Wycinek nieba obserwowany przez kamerę prowadzenia, zawiera najczęściej gwiazdy należące do gromad gwiazd będących w różnych stadiach ewolucji.

(zadającego), którym odpowiada realizacja konkretnych zadań prowadzenia teleskopu .

4.5.1. Przemieszczenie teleskopu w dowolny fragment nieba (zadanie Z.21).

Z reguły wycinek nieba, w którym mają być przeprowadzone obserwacje, określany jest przez podanie jego przybliżonych współrzędnych oraz jego szczegółowej mapy. Sposób ten można przenieść na odpowiedni algorytm systemu wizyjnego. Po sprowadzeniu teleskopu w zadaną okolicę nieba, wystarczy jako obraz zadany oraz obrazy należące do zbioru **W**, przyjąć obrazy odpowiadające mapie poszukiwanego obszaru nieba. Obrazy odpowiadające zadanemu fragmentowi nieba pochodzić mogą z bazy danych zawierającej często obserwowane fragmenty nieba. Jest też możliwość ich sztucznego tworzenia na podstawie zadawanych map obszarów nieba (różnice między tymi dwoma sposobami kreacji obrazów zacierają się, gdy baza danych zawiera zbiór obrazów w postaci przetworzonej np. w formie zbioru wektorów cech obiektów).

4.5.2. Kompensacja ruchu dobowego Ziemi (zadanie Z.22).

Jak zostało powiedziane w punkcie (2.1) funkcję tę spełnia oddzielny układ, zaś rola wizyjnego systemu prowadzenia sprowadza się do korekcji efektów działania tego układu. Problem ten jest omówiony w jednym z następnych punktów.

4.5.3. Stabilizacja położenia teleskopu oraz korekcja niedokładności działania układu kompensacji ruchu dobowego Ziemi (zadanie Z.31).

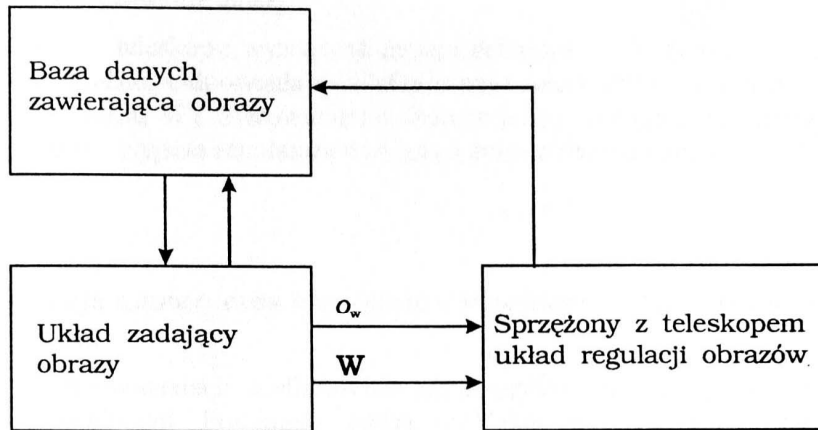
Stabilizacja położenia teleskopu następuje, gdy obraz zadany i obrazy należące do zbioru **W**, nie zmieniają się w czasie.

4.5.4. Śledzenie ruchomych obiektów (zadanie Z.32).

Zadanie to polega na przesuwaniu teleskopu w zadanym kierunku i z zadaną prędkością. Łatwo to uzyskać poprzez ciągłą zmianę współrzędnych obiektów w obrazie zadanym oraz w obrazach zbioru **W**.

4.5.5. Zmiana położenia teleskopu względem sfery niebieskiej według zadanej trajektorii (zadanie Z.33).

Trajektorię ruchu teleskopu wyznaczać można definiując zbiór punktów przez jaki powinna przechodzić. Odpowiada to zdefiniowaniu zbioru obrazów zadanych (oraz należących do zbioru **W**). Sterowanie teleskopem polega następnie na odpowiednim wprowadzaniu na wyjście regulatora wizyjnego elementów tego zbioru.



Rysunek 4.5
Wizyjny system prowadzenia teleskopu.

4.6. Realizacja numeryczna algorytmów wizyjnego systemu prowadzenia teleskopu.

W poprzednich rozdziałach zdefiniowany został ogólny algorytm działania układu sterowania teleskopem. Pominięto jednak problemy obliczeniowe. Dotyczą one głównie sposobu obliczania wartości funkcji podobieństwa p_g . Wyznaczenie jej wartości poprzedzone być musi obliczeniem funkcji podobieństwa p_1 , zdefiniowanej w przestrzeni zbiorów wektorów cech obiektów.

4.6.1. Obliczanie wartości funkcji podobieństwa p_1 .

Jednorazowe obliczenie funkcji podobieństwa p_1 pociąga za sobą konieczność wielokrotnego (zgodnie ze wzorem 4.15) liczenia funkcji g . Ilość wymaganych obliczeń funkcji g uzależniona jest od ilości możliwych, różniących się między sobą, dyslokacji pomiędzy obrazem wejściowym, a obrazem wzorcowym. Podstawą do wygenerowania jednego z możliwych przesunięć jest przyjęcie, iż pewne dwa obiekty należące odpowiednio do obrazu wzorcowego i do obrazu aktualnego odpowiadają naprawdę jednemu rzeczywistemu obiektowi. Różnica w położeniu obiektu na obrazie aktualnym i wzorcowym wyznacza przesunięcie pomiędzy tymi obrazami. Zbiór wszystkich możliwych przesunięć T tworzy się poprzez obliczenie różnic w położeniu obiektów w każdej parze zestawionej z obiektów aktualnego i wzorcowego obrazu. Powolny sposób obliczenia funkcji p_1 poprzez przegląd wszystkich możliwych par i wybór przesunięcia, które maksymalizuje funkcję g (4.15) można przyspieszyć kończąc przegląd po napotkaniu pozytywnego rozwiązania, tj. znalezieniu takiego przesunięcia p_{opt} , przy którym zgodność aktualnego obrazu ze wzorcem jest dostatecznie duża:

$$g(\mathbf{o}_w, \mathbf{o}_{\text{popt}}) > g_g ;$$

(4.32)

gdzie: g_g - ustalona wartość graniczna

Przesunięcie $\mathbf{p}_{\text{opt}}$ uznaje się za szukane przesunięcie między wzorcem a obrazem aktualnym. Metoda działa tym efektywniej, im szybciej następuje pozytywne rozwiązanie. Oznacza to, iż w pierwszej kolejności powinna brać pod uwagę pary najbardziej istotnych obiektów, gdyż dla nich prawdopodobieństwo, iż wyznaczają przesunięcie między obrazami, jest największe. Wymóg ten łatwo spełnić odpowiednio sortując, poprzez zmianę indeksacji, obiekty wzorca i bieżącego obrazu (dobre rezultaty przyniosło posortowanie obiektów zgodnie z ich sumaryczną jasnością I).

Jednak podstawowe znaczenie dla prędkości obliczania wartości funkcji p_1 , ma efektywność obliczania wartości funkcji g .

4.6.2. Obliczanie wartości funkcji g (miary zgodności obrazu z obrazem wzorcowym).

Narzucającym się sposobem obliczenia funkcji g jest wyznaczenie wartości funkcji δ (4.15) dla każdego składnika wzoru (4.12) drogą poszukiwania odpowiednio bliskiego obiektu $\mathbf{b}$ wzorca ($d(\mathbf{b}, \mathbf{b}_{2i}) < r$). Sposób ten jest jednak zbyt czasochłonny.

Wśród składowych wektora cech obiektu (obiektu drugiego etapu) można wyróżnić pewne współrzędne. Niech $\mathbf{E}$ oznacza zbiór indeksów wybranych współrzędnych (zgodnie z 3.7, $\mathbf{E} \subset \{1, 2, 3, 4\}$). Powstała podprzestrzeń przestrzeni cech oznaczana będzie przez $\mathbf{V}$. W przestrzeni tej wprowadzić można funkcję:

$$\chi: \mathbf{V} \rightarrow \mathbf{I}_w \cup \{0\}$$

(4.33)

gdzie: $\mathbf{I}_w$ - zbiór indeksów obiektów w obrazie wzorcowym $\mathbf{o}_w$;

której wartości określa wyrażenie:

$$\chi(\mathbf{v}) = \begin{cases} i & \text{gdy } \exists i \in \mathbf{I}_w : \forall j \in \mathbf{E} : |\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_{wij}| < r_j, \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases} \quad (4.34)$$

gdzie: $\mathbf{v} \in \mathbf{V}$,

$\mathbf{v}_j$ - j -ta współrzędna wektora $\mathbf{v}$

$\mathbf{v}_{wij}$ - j -ta współrzędna i -tego obiektu obrazu wzorcowego $\mathbf{o}_w$,

r_j - ustalone liczby.

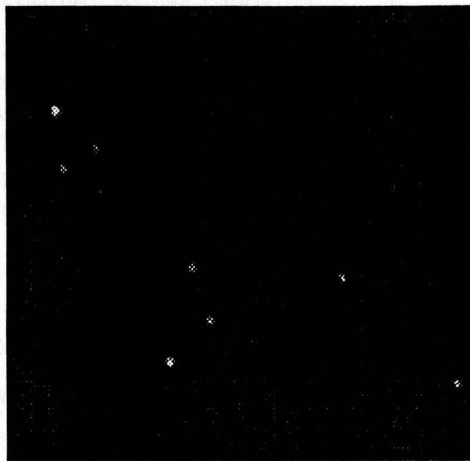
Wartość funkcji χ jest więc równa zero, gdy nie istnieje obiekt we wzorcu który ma cechy w pobliżu danego punktu $\mathbf{v}$ podprzestrzeni $\mathbf{V}$, lub χ jest równe indeksowi numerującemu obiekt, gdy odpowiedni obiekt wzorca istnieje. Jeśli istnieje ich więcej wybiera się najbliższy punktowi w sensie metryki d (4.10).

Jeśli cechy obiektów są liczbami całkowitymi, można stabilizować wartości funkcji χ dla całej skwantowanej przestrzeni wybranych cech. Odpowiadający danemu punktowi obiekt wzorca (jeśli istnieje) jest łatwo dostępny, a zatem obliczenie funkcji g przy zastosowaniu powyższej techniki jest bardzo szybkie.

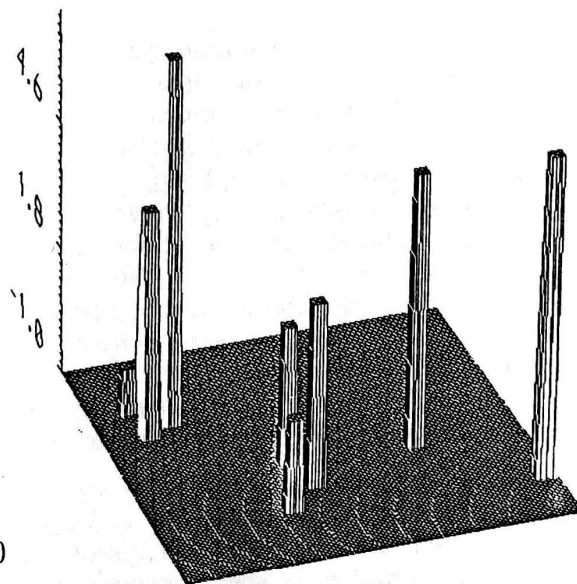
Warunkiem efektywności powyższego algorytmu jest możliwość doboru takich cech spośród współrzędnych wektora cech, które jednoznacznie określają obiekt. Ich ilość jest też ograniczona koniecznością zapamiętania w pamięci komputera wartości funkcji χ dla całej generowanej przez nie podprzestrzeni. Z powyższych względów wyróżniono dwie cechy obiektów - dwie współrzędne ich środków na obrazie. Funkcja χ jest więc określona na płaszczyźnie. Ma to tę ciekawą interpretację, że można ją uważać za obraz, którego piksele są bądź zerami, bądź indeksami, wskaźnikami do informacji o obiekcie znajdującym się w analogicznej okolicy obrazu wzorcowego.

Metodę obliczania funkcji g poprzez obraz wskaźnikowy można uważać za jeszcze jeden etap przetwarzania obrazów. Dokonuje on transformacji obrazu w nową przestrzeń obrazów wskaźnikowych. W przestrzeni tej istnieje bowiem bardzo szybki algorytm obliczania funkcji zgodności obrazów.

Rysunek 4.6.a przedstawia przykładowy obraz grupy gwiazd uzyskany kamerą systemu prowadzenia teleskopu. Obrazowi temu odpowiada umieszczona na rysunku 4.6.b trójwymiarowa ilustracja obrazu wskaźnikowego.



a)



b)

Rysunek 4.6

a) obraz wzorcowy,

b) trójwymiarowa ilustracja obrazu wskaźnikowego utworzonego z obrazu wzorcowego, (obiektom o większej jasności odpowiadają wskaźniki o mniejszej wartości).

5. Implementacja systemu prowadzenia teleskopu.

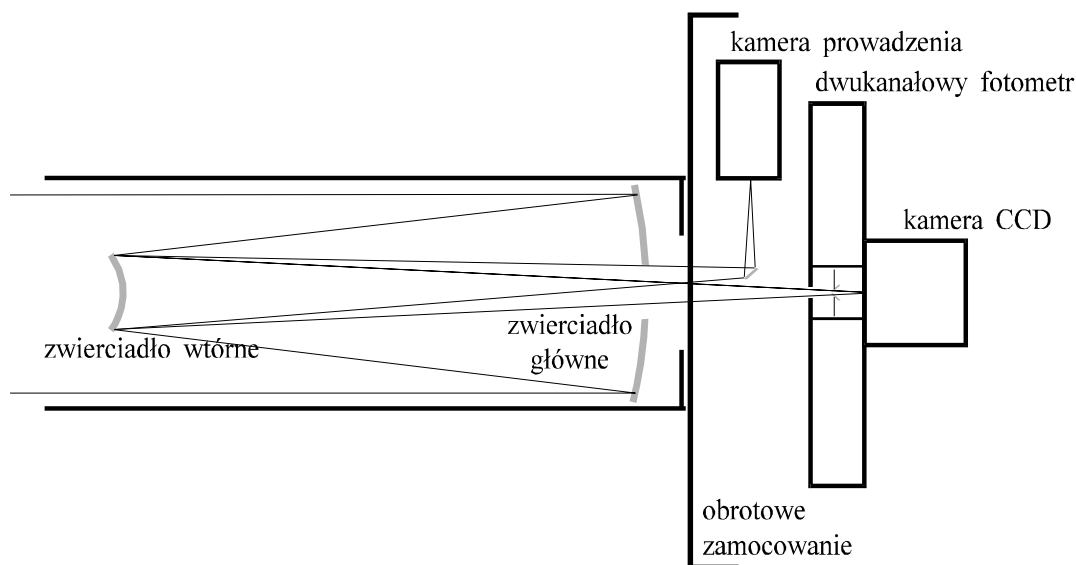
Opisany w rozdziale czwartym algorytm działania układu sterowania teleskopem został praktycznie zrealizowany w postaci zbudowanego przez autora systemu prowadzenia teleskopu w obserwatorium astronomicznym Wyższej Szkoły Pedagogicznej na Suhorze. W bieżącym, rozdziale zostaną zaprezentowane szczegóły rozwiązań sprzętowych działającego systemu prowadzenia, oraz konkretna implementacja zastosowanych w nim algorytmów.

5.1. Realizacja sprzętowa elementów systemu prowadzenia teleskopu.

5.1.1. Układ wprowadzający obraz nieba do pamięci komputera

W systemie prowadzenia wykorzystano obraz nieba tworzony przez główny układ optyczny teleskopu. Na układ ten składają się dwa zwierciadła (rysunek 5.1). Głównie, jest wklęsłym zwierciadłem paraboloidalnym o średnicy 0.6 metra. Zwierciadło pomocnicze jest lekko wypukłe i ma kształt hiperboloidy¹³. Efektywna ogniskowa układu wynosi 7 metrów. Konstrukcja teleskopu umożliwia zainstalowanie w jego płaszczyźnie ogniskowej, obok przyrządów obserwacyjnych, dodatkowej kamery, wykorzystywanej w systemie prowadzenia. Schematyczny sposób zamocowania kamery przedstawiono na rysunku 5.1. Opisane elementy uwidocznione są również na fotografii 5.1. Jak wynika ze wstępnej dyskusji (podrozdział 3.2.1) można zastosować kamery CCD lub czułe kamery typu night-vision. Obydwa wymienione typy kamer są dostępne w obserwatorium na Suhorze. Kamera CCD (typu STAR 1, produkcji kanadyjskiej) ma możliwość regulacji czasu ekspozycji, a zatem i czułości. Służąca temu mechaniczna migawka wprowadza jednak ograniczenie ilości sczytywanych w jednostce czasu obrazów do około dwóch na sekundę. Można ją zatem wykorzystywać wyłącznie w sytuacjach powolnych zmian położenia teleskopu. Przy czasie ekspozycji rzędu 4 sekundy, kamerą tą można określać położenie gwiazd o jasności większej niż 15 wielkość gwiazdowa [22]. Kamera wyposażona jest we własny, sterowany mikrokomputerem układ przetworników A/C, oraz pamięć obrazu. Obraz w niej zapisany można przenieść do komputera sterującego teleskopem z pomocą odpowiednich interfejsów.

¹³Opisany układ optyczny nosi nazwę układu Cassegraina [22]

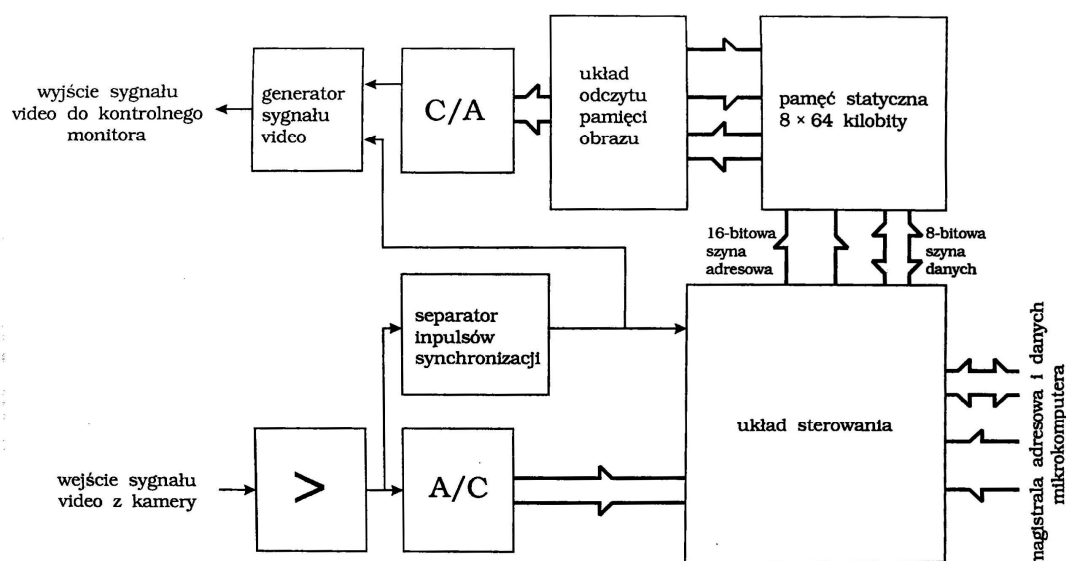


Rysunek 5.1

Układ optyczny, oraz urządzenia obserwacyjne teleskopu na Suchozrze.

Mniej czułe, lecz szybsze są kamery wyprowadzające sygnał zgodny ze standardem telewizyjnym (punkt 3.2.1). Mogą to być zarówno kamery CCD, jak i klasyczne z lampą analizującą. Dostępna w obserwatorium kamera *night-vision* produkcji niemiecko-węgierskiej umożliwia analizę położenia gwiazd jaśniejszych od 13 wielkości gwiazdowej. Kamera współpracuje z kartą *frame grabber* (punkt 3.2.1) produkcji polskiej¹⁴ o wielkości obrazu 256x256 i 256 poziomach kwantowania jasności pikseli. Parametry te wymagają istnienia 64 kB (kilobajtów) pamięci dla obrazu. Pamięć ta w formie szybkiej pamięci statycznej jest fizycznie zainstalowana w samej karcie *frame grabber*, należy jednak do przestrzeni adresowej procesora mikrokomputera. Rysunek 5.2 przedstawia schemat funkcjonalny karty *frame grabber*. Prędkość przetwarzania układu kamera - *frame grabber* (50 obrazów na sekundę) oraz jego dostateczna czułość przesądziły o jego zastosowaniu w systemie prowadzenia teleskopu.

¹⁴Karta montowana jest w krakowskiej firmie ARCO ze specjalizowanych układów scalonych, wśród których podstawowe znaczenie dla jej jakości pracy ma układ przetwornika A/C.



Rysunek 5.2
Schemat funkcjonalny karty *frame grabber* produkcji firmy ARCO.

5.1.2. Mikrokomputer.

System prowadzenia może działać na powszechnie dostępnych komputerach osobistych IBM z 32-bitowymi procesorami Intel 80386 lub Intel I486. W przypadku procesora 80386, dla efektywniejszej pracy systemu, należy zainstalować koprocesor numeryczny 80387 (procesor I486 już posiada wbudowany koprocesor). System mikrokomputerowy musi posiadać:

- standardowy (IBM PC) system obsługi przerwań zegarowych [30], wykorzystany do generacji impulsów sterujących silnikami (punkt 5.2.1.7),
- dyskową pamięć masową o wielkości powyżej 760 kB (najlepiej dysk twardy);
- pełną, to znaczy 640 kB, tzw. klasyczną [30] pamięć operacyjną;
- kartę grafiki SVGA o rozdzielczości co najmniej 640x480 przy 256 kolorach;
- łącze komunikacji szeregowej typu Centronix [31].

5.1.3. Elementy wykonawcze

W skład elementów wykonawczych wchodzi silniki elektryczne sprzężone z układami ruchów drobnych teleskopu (rozdział 2) oraz sterownik silników. Sterownik ten złożony jest z dwu identycznych układów, z których każdy obsługuje jeden silnik elektryczny. W skład każdego układu wchodzi prosty, trzybitowy przetwornik C/A, którego wejście bitowe podłączone jest do trzech z ośmiu bitowych wyjść danych złącza szeregowego (Centronix) komputera [31]. Układ ma więc możliwość wyprowadzenia ośmiu wartości napięcia sterującego silnikiem. Przyjęto, iż cztery z nich odpowiadają dodatnim wartościom napięcia, trzy ujemnym,

zaś jeden poziom jest poziomem zerowym. Różnice napięć między kolejnymi stopniami kwantyzacji są jednakowe. Napięcie wyjściowe przetwornika C/A po wzmocnieniu we wzmacniaczu mocy steruje odpowiednim silnikiem prowadzenia.

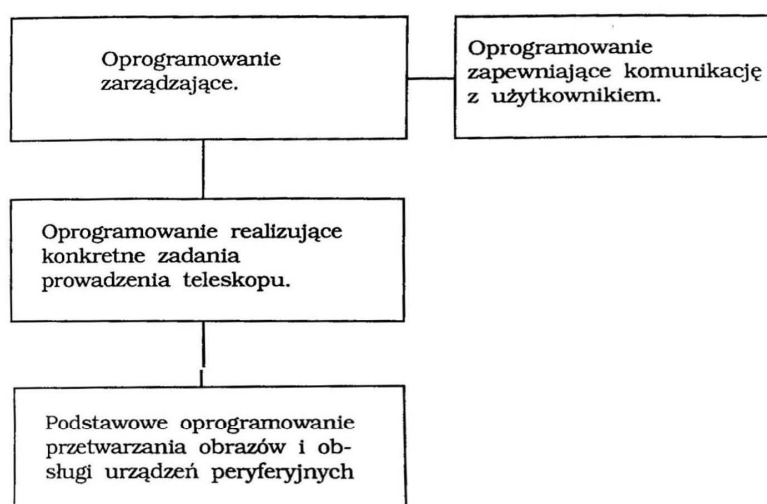
5.2. Implementacja algorytmów prowadzenia teleskopu.

Oprogramowanie systemu prowadzenia teleskopu napisane jest w języku programowania C, oraz w assemblerze procesorów 80386, I486. Jest przeznaczone do pracy w systemie operacyjnym DOS (wersja 3.30 lub późniejsza). Program wykonywalny został stworzony z użyciem kompilatora firmy Borland - Turbo C wersji 2.0, a także z użyciem kompilatora assemblera - Tasm wersji 2.5, tejże firmy.

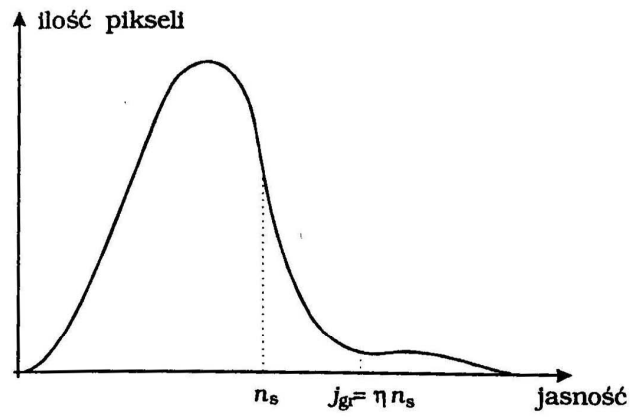
Oprogramowanie ma budowę hierarchiczną. W uproszczonej formie przedstawia ją rysunek 5.3.

Rozpoczyna się ona oprogramowaniem spełniającym rolę wyspecjalizowanego pod kątem zadań prowadzenia teleskopu systemu operacyjnego. Ostatnią, najniższą warstwę tworzy zaś podstawowe oprogramowanie przetwarzania obrazów oraz obsługi urządzeń sterujących silnikami teleskopu.

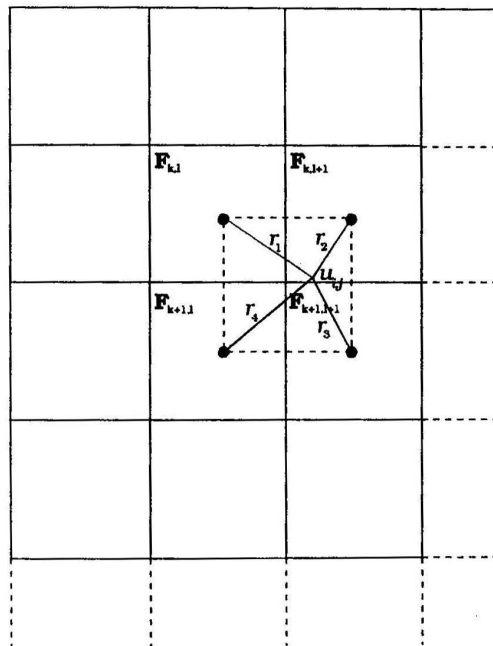
Podrozdział 5.2 zawierał będzie w dalszej części przegląd niektórych istotniejszych procedur należących do poszczególnych grup. W sytuacji, w której na całość programu sterującego teleskopem składa się około czterystu różnych procedur opisy te muszą mieć charakter skrócony i wybiórczy. Opisywane są tylko te spośród nich, od których najbardziej zależy efektywność pracy systemu, lub których postać jest w pewien sposób niestandardowa. Przegląd procedur prowadzony będzie w kierunku wstępującym.



Rysunek 5.3
Hierarchia oprogramowania systemu prowadzenia teleskopu.



Rysunek 5.4
Ilustracja metody wyznaczania wartości poziomu tła.



Rysunek 5.5

Określenie wartości funkcji θ .

Niech punkt u o współrzędnych i, j znajduje się w odległościach r_1, r_2, r_3, r_4 od środków obszarów $F_{k,l}, F_{k,l+1}, F_{k+1,l}, F_{k+1,l+1}$, mających średnie jasności $\lambda_{k,l}, \lambda_{k,l+1}, \lambda_{k+1,l}, \lambda_{k+1,l+1}$ (sposób wyboru obszarów wyjaśnia rysunek). Wartości funkcji $\theta(i, j)$ określone są następująco:

$$\theta(i, j) = \frac{w_1 \lambda_1 + \dots + w_4 \lambda_4}{w_1 + \dots + w_4} \quad \text{gdzie: } w_i = e^{-r_i^2/a}; \quad i=1, \dots, 4; \quad a - \text{ustalona dodatnia liczba.}$$

5.2.1. Podstawowe oprogramowanie przetwarzania obrazów.

5.2.1.1. Określenie poziomu tła obrazu.

Procesy obróbki obrazów dążą na wstępie do wyznaczenia spójnych zbiorów pikseli, tworzących obiekty. Poprzedzać je musi ustalenie wartości progowej l_{gr} (wzór 3.6) jasności pikseli tworzących obiekt. W programie stosuje się dwa rozwiązania.

Jedno opiera się na funkcji histogramu jasności pikseli w obrazie. Funkcja ta, (rysunek 5.4), ma bardzo wyraźnie zaznaczające się maksimum odpowiadające średniej jasności tła nieba. Okazuje się, że wartość progową l_{gr} można zadowalająco dokładnie wyznaczyć na podstawie wartości jasności n_s , przy której następuje największy spadek funkcji histogramu¹⁵. Przyjmuje się, że:

$$l_{gr} = \eta n_s \quad (5.1)$$

gdzie: $\eta \in < 0.9, 1.3 >$.

Wartość $\eta = 0.9$ stosuje się przy wyodrębnianiu z obrazu bardzo słabych obiektów, podczas gdy wartość $\eta = 1.3$ służy do celowego obniżenia czułości skanowania obiektów.

W drugim rozwiązaniu przyjmuje się, iż wartość progowa jasności pikseli obiektów jest uzależniona od współrzędnych obrazu. Jest więc funkcją:

$$l_{gr}'(i,j) : \mathbf{N}_1 \times \mathbf{N}_2 \rightarrow \mathbf{L} \quad (5.2)$$

(oznaczenia zgodnie z (3.5)).

Istnieje zatem możliwość dokładnego jej dopasowania do lokalnych zmian poziomu tła obrazu. Zmiany te spowodowane są wadami przetwornika obrazowego (różna czułość w pewnych fragmentach obrazu), lub przysłanianiem przez elementy

¹⁵Pochodną dyskretną funkcji histogramu $h(l)$: $\mathbf{L} \rightarrow \mathbf{N}^*$ ($\mathbf{N}^*$ - zbiór liczb naturalnych z zerem) można estymować różnicą tzw. średnich kroczących:

$$\frac{\partial h(l)}{\partial l} = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{\substack{i=l+1 \\ i < L_{\max}}}^{l+n} h(i) - \sum_{\substack{i=l-n \\ i \geq 0}}^{l-1} h(i) \right) \quad (p5.1)$$

gdzie n - ustalona liczba naturalna.
pozostałe oznaczenia jak w (3.5).

Punkt, w którym wartość powyższego wyrażenia osiąga minimum, przyjmuje się za wartość n_s . Minimum wyznacza się przez przegląd wszystkich wartości $l \in \mathbf{L}$. Wykorzystując przy obliczaniu wartości wyrażenia (p5.1) w pewnym punkcie, wartość tego wyrażenia w punkcie poprzednim (jak wynika z (p5.1) należy dokonać tylko dwóch operacji dodawania i odejmowania) opisana metoda jest bardzo efektywna.

konstrukcyjne kamery części światła odbitego od zwierciadeł (zwłaszcza na obrzeżach obrazu).

Funkcję l_{gr}' wyznacza się jako odpowiednio gładką aproksymację wartości jasności tła rzeczywistego obrazu nieba. Wyznaczenie jej przebiega w następujących etapach:

1. Obliczenie średnich jasności $\lambda_{k,l}$ ($k, l=1, 2, \dots, m$), pikseli wchodzących w skład fragmentów $F_{k,l}$ obrazu (obraz dzielony jest na m^2 równych części-fragmentów (rysunek 5.5)).
2. Powtórne obliczenie wartości $\lambda_{k,l}$, ale z uwzględnieniem tylko tych pikseli $u_{i,j}$, dla których:

$$|l(u_{i,j}) - \lambda_{k,l}| < \Delta_\lambda \quad (5.3)$$

gdzie: $\Delta_\lambda \in \mathbf{L}$ - ustalona liczba.

Piksele o dużej jasności np. należące do obiektów, nie wpływają zatem na wartość $\lambda_{k,l}$.

3. Określenie i stabilizowanie wartości funkcji $\theta(i,j)$, która interpoluje wartości $\lambda_{k,l}$:
Zasadę obliczania wartości funkcji interpolującej podaje rysunek 5.5. Funkcja θ jest tablicowana we wszystkich punktach obrazu.
4. Modyfikacja stabilizowanych wartości funkcji θ zgodnie ze wzorem:

$$\theta(i,j) := \theta(i,j) + \Delta_\theta \quad (5.4)$$

gdzie: $\Delta_\theta \in \mathbf{L}$ - ustalona liczba.

Po przeprowadzeniu tych operacji wartości funkcji $l_{gr}'(i,j)$ są określone przez odpowiednie wartości funkcji $\theta(i,j)$.

5.2.1.2. Określenie zbiorów pikseli tworzących obiekty.

Określenie zbioru pikseli tworzących obiekt polega na zapamiętaniu ich współrzędnych oraz jasności w pewnej tablicy. Tworzenie zbioru rozpoczyna się odszukaniem w kolejnych wierszach obrazu piksela, którego jasność przekracza próg l_{gr} lub $l_{gr}'(i,j)$. Wraz z odpowiednimi pikselami z sąsiedztwa (oraz z sąsiedztwa odpowiednich pikseli sąsiednich; definicja 3.6); zostaje on zaliczany do obiektu. Definicja (3.6) nasuwa myśl użycia do odszukania tych pikseli algorytmu rekurencyjnego. Jego zapis w notacji liniowej jest następujący: (zapis w części wykonywalnej jest zgodny z językiem programowania *Pascal*, w części deklaratywnej może natomiast zawierać nieformalne deklaracje opisowe)

```
type pix= record
    x,y,l:integer;
```

```

end;
N                - maksymalna liczba pikseli w obiekcie,
var i: integer;   - licznik pikseli obiektu,
m : array [ 1..N ] of pix  - tablica rekordów zawierająca współrzędne
                           oraz jasności pikseli obiektu,
N1,N2            - ilość pikseli we współrzędnej pionowej i
                           poziomej obrazu,
l: array[ 0..N1-1, 0..N2-1 ] of integer  - obraz rastrowy,
lgr[x,y]         funkcja zwracająca wartości poziomu
                           tła  $lgr[x,y] \equiv l_{gr}(x,y)$ 

```

```

procedure sm ( x,y: integer );
begin
  if l[x,y] >= lgr[x,y] then
    begin
      m.x[i]:= x; m.y[i]:= y; m.l[i]:= l[x,y];
      l[x,y]:=0;
      sm( x-1,y-1 );
      sm( x+1,y-1 );
      sm( x-1,y+1 );
      sm( x+1,y+1 );
      i:=i+1;
    end;
  end;
end;

```

(5.5)

Kolejne argumenty wywołania procedury sm (współrzędne piksela) są zapamiętywane na stosie [41], co umożliwia powrót do takich pikseli obiektu, z których możliwe jest kontynuowanie dalszych poszukiwań.

W pierwszym wywołaniu procedury jej argumentami są współrzędne piksela o jasności większej od wartości progowej. Piksele te mogą być znajduwane przez przeszukiwanie punktów obrazu z pewnym określonym krokiem. Jego wielkość powinna być tak dobrana (np. równa 2), by zagwarantować, iż nie zostaną pominięte obiekty o określonej wielkości. Od efektywności pracy algorytmu odnajdującego obiekty, w ogromnym stopniu zależy prędkość reakcji regulatora położenia.

Algorytm powinien więc zostać zapisany w języku maszynowym komputera oraz w sposób możliwie czasooptymalny. Asemblerowa funkcja **scan_line1**, przedstawiona w dodatku 4, jest próbą sprostania tym wymogom. Jej działanie polega na poszukiwaniu jednego obiektu w zadanej linii obrazu. Po znalezieniu obiektu zwraca do programu wywołującego następujące wielkości:

- ilość pikseli obiektu,
- jego sumaryczną jasność,
- współrzędne pikseli obiektu.

W celu znalezienia pikseli obiektu funkcja **scan_line1** wywołuje funkcję **sma1**, działającą zgodnie z przedstawionym rekurencyjnym algorytmem. Zapis tej funkcji jest jednak nieco inny. Warunek (5.5) sprawdzany jest przed każdym wywołaniem funkcji **sma1** dla kolejnego piksela, a nie po nim. Przyspiesza to działanie procedury, mimo iż jej kod jest nieco dłuższy. Funkcja **sma1** korzysta ze stosu procesora (rejstry SS, SP [30]), zapamiętując w nim nie współrzędne pikseli, lecz miejsce w programie z którego została wywołana dla ich znalezienia .

Optymalizację czasu działania funkcji osiągnięto przez odpowiedni sposób konstrukcji warunków logicznych, oraz składowanie wszystkich jej zmiennych pomocniczych w rejestrach procesora. Najbardziej czasochłonne odwołania do pamięci komputera ograniczono wyłącznie do odwołań do pamięci obrazu, pamięci programu oraz do stosu.

Funkcje **scan_line** oraz **sma** (dodatek 4) stanowią jeszcze inną implementację problemu wyszukiwania obiektów w jednej linii obrazu. Najistotniejsze w stosunku do wcześniejszej pary funkcji (**scan_line1** i **sma1**) różnice dotyczą sposobu zapamiętywania współrzędnych kolejno sprawdzanych pikseli. Funkcja **sma** nie wywołuje już siebie rekurencyjnie, a do zapamiętania współrzędnych pikseli używa pewnej macierzy (macierz adresowana rejestrami FS i SI). Używana jest ona jak pewien dodatkowy stos.

W obu wersjach procedury znajdującej piksele (**sma**, **sma1**), czterokrotnie wywoływane są podobne sekwencje instrukcji sprawdzających kolejne sąsiednie piksele. Przykładowo są nimi sekwencje:

sma1:	sma:
inc bl	inc bl
jz pa1	cmp [byte ptr x], cl
cmp[byte ptr bx], cl	jb pa1
jb pa1	add si, 2
call sma1	mov [fs:si], bx
pa1: dec bl	pa1: sub bl, 2

Czasy wykonania powyższych sekwencji są niemal identyczne, o tym która z procedur jest efektywniejsza decyduje dopiero dodatkowy czas związany z wstępnymi czynnościami, poprzedzającymi ich wywołanie (zależny od procedur **scan_line1**, **scan_line**).

Tabela 5.1 przedstawia otrzymane doświadczalnie porównawcze czasy wykonania obu wersji par procedur dla różnej ilości i wielkości obiektów. Jak widać nieco szybciej działa wersja druga¹⁶.

¹⁶Porównanie czasów wykonania procedur ma charakter przybliżony, gdyż procedura **sma** dokonuje jeszcze dodatkowej operacji (bardzo krótkiej) polegającej na zapamiętaniu jasności wszystkich pikseli obiektu (umożliwia to zastosowanie ulepszanego algorytmu wyznaczania położenia środka obiektu)

scan_line1, sma1	ilość obiektów obrazu $n_o=1$	$n_o=3$	$n_o=10$
ilość pikseli w obiekcie $n=10$	11 ms	15	21
$n=40$	14	18	30
$n=200$	49	62	120
scan_line, sma	ilość obiektów obrazu $n_o=1$	$n_o=3$	$n_o=10$
ilość pikseli w obiekcie $n=10$	9 ms	13	19
$n=40$	11	15	28
$n=200$	43	59	112

Tabela 5.1

Procedura typu **scan_line** wywoływana jest przez funkcję poszukującą obiekty na całym obrazie rastrowym. Funkcja ta o nazwie **scan_objects** przedstawiona jest w dodatku 4. Po każdym pomyślnym (zakończonym znalezieniem obiektu) wywołaniu funkcji **scan_line** następuje zapisanie parametrów obiektu w pewnym rekordzie. Struktura definiująca ten rekord, o nazwie **object**, przedstawiona jest również w dodatku 4. W rekordzie tym zdefiniowano pola odpowiadające cechom obiektów drugiego etapu (definicja 3.7). Jasność obiektu, oraz ilość jego pikseli są liczone na bieżąco przez funkcje **scan_line**, mogą być więc wpisane do rekordu. Obliczeniem współrzędnych środka obiektu (zgodnie z (3.30)) zajmuje się natomiast oddzielna funkcja.

Kolejne rekordy typu **object** odpowiadające kolejno odnajdywanym obiektom są zapisywane w strukturze o nazwie **stage** (dodatek 4). Jest to forma reprezentacji obrazu traktowanego jako zbiór wektorów opisujących cechy obiektów (obiektów drugiego etapu). Zasadniczym elementem tej struktury jest wskaźnik do macierzy rekordów typu **object**.

5.2.1.3. Obliczenie współrzędnych środka obiektu.

W analizie dokładności (punkt 3.2.3) stwierdzono, iż błąd wyznaczenia położenia środka obiektu może być wielokrotnie mniejszy od odległości między sąsiednimi pikselami obrazu. Położenie to powinno być zatem reprezentowane w postaci liczb zmiennoprzecinkowych. Standardowe liczby zmiennoprzecinkowe języka C [26] (typ *float* lub *double*) zajmują jednak zbyt wiele miejsca w pamięci komputera (4 lub 8 bajtów), a przetwarzanie ich, nawet przez procesory arytmetyczne, jest wolniejsze niż liczb całkowitych. Z tych powodów, zdecydowano się na reprezentację położenia środków obiektów w formie liczb całkowitych, powstałych przez pomnożenie dokładnych współrzędnych przez liczbę 256.

W praktycznej realizacji algorytmu oblicza się najpierw sumę ze wzoru (3.15: $1/n \sum_{u \in b} l(u_{i,j})$) którą mnoży się przez 256, wynik zaś dzieli przez n (ilość pikseli). Powyższa metoda zachowuje dokładność określenia środków równą 0.5/256 piksela. Powstaje jednak problem reprezentacji pomnożonej przez 256 sumy, przekraczającej w przypadku dużych obiektów liczbę 32 bitową, oraz problem szybkiego podzielenia tej liczby przez n . Problemy te rozwiązano zapisując powyższy algorytm w postaci funkcji assemblerowej. Funkcja **centre** (dodatek 4) oblicza wartość sumy zapisując ją w rejestrze 32 bitowym (EDX), wynik jej mnożenia przez 256 umieszcza w parze rejestrów 32 bitowych (EDX,EAX). Następnie korzystając z rozkazu dzielenia liczby 64 bitowej (para EDX,EAX) przez 32 bitową oblicza wartość współrzędnej środka obiektu.

5.2.1.4. Impulsowe sterowanie silnikami teleskopu.

Zgodnie z podrozdziałem 2.3, w systemie prowadzenia zastosowano impulsowe sterowanie silników wykonawczych, z modulacją szerokości impulsu. W prostej realizacji tego sposobu sterowania, czas trwania impulsu można określać poprzez procedurę wprowadzającą określonej długości przerwę w działaniu komputera (np. procedura **delay** z pakietu Turbo C). Przy dużym współczynniku wypełnienia impulsów, sposób ten prowadzi jednak do strat w mocy obliczeniowej komputera.

Z tych względów zastosowano rozwiązanie polegające na uruchomieniu w systemie komputerowym niezależnego od aktualnie wykonywanych zadań, synchronicznego procesu. W procesie tym wywoływana jest funkcja **i_driver** (dodatek 4), której zadaniem jest włączenie i wyłączenie po zadanym czasie silników teleskopu. Funkcja zrealizowana jest jako funkcja obsługująca przerwanie sprzętowe [30] pochodzące od odpowiednio przeprogramowanego zegara systemowego [30]. Wywoływana jest około 990 razy na sekundę, co gwarantuje uzyskanie odpowiednio krótkiego minimalnego czasu trwania impulsu. Komunikacja funkcji **i_driver** z funkcjami określającymi wartość sterowania odbywa się poprzez pewien wydzielony (krytyczny) obszar pamięci operacyjnej. Dostęp do niego posiada tylko jedna pomocnicza funkcja - **set_i_driver**. Ustala ona wartości czasów działania poszczególnych silników.

5.2.2. Procedury realizujące konkretne zadania związane ze sterowaniem ruchem teleskopu.

5.2.2.1. Tworzenie wzorców obrazu nieba.

Procedura realizująca tę czynność tworzy obraz wskaźnikowy odpowiadający obrazowi wzorcowemu, oraz zbiór obrazów wskaźnikowych **W**, definiujących klasę **K₂** (punkt 4.3.2.1).

Procedura może być uruchamiana przez prowadzącego obserwację, lub przez inne, opisane niżej podprogramy (co zostanie zaznaczone).

5.2.2.2. Ustalanie elementów macierzy U, transformacji układów współrzędnych.

Elementy macierzy U można ustalić korzystając z opisanej w przypisie do punktu 4.3.1.2 prostej metody identyfikacji. Podprogram dokonujący tej operacji współpracuje dodatkowo z procedurami realizującymi zapis i odczyt ustalonych wartości elementów macierzy na dysk. Przy wielodniowych obserwacjach jednej okolicy nieba nie zachodzi więc konieczność każdorazowej identyfikacji macierzy.

Procedura jest uruchamiana przez prowadzącego obserwacje.

5.2.2.3. Ustalanie dodatkowego, pomocniczego zestawu wzorców obrazu nieba.

Sposób tworzenia dodatkowego zestawu wzorców jest identyczny, jak w punkcie 5.2.2.1.

Dodatkowe wzorce obrazów są wykorzystane w następnej procedurze.

5.2.2.4. Zmiana położenia teleskopu według zadanej trajektorii.

W podprogramie tym, trajektoria położenia teleskopu ustalana jest za pomocą tylko dwóch pozycji. Pierwsza pozycja definiowana jest przez zestaw wzorców obrazów ustalony w punkcie 5.2.2.1, i nazywana jest pozycją *gwiazdy*. Druga pozycja definiowana jest pomocniczym zestawem wzorców (5.2.2.3). Nazywana jest ona pozycją *nieba*. Działanie podprogramu polega na okresowym zmienianiu położenia teleskopu w ten sposób, by przez ustalony okres czasu T_g pozycja teleskopu odpowiadała pozycji *gwiazdy*, zaś przez okres czasu T_n pozycji *nieba*.

Przedstawiony prosty sposób sterowania teleskopem jest niezmiernie użyteczny w wielu typach obserwacji astronomicznych. W szczególności:

1. Po ustaleniu: $T_n=0$, $T_g \neq 0$ system prowadzenia stabilizuje położenie teleskopu w pozycji *gwiazdy* (zadanie Z31, rozdział 2); Możliwe są wówczas fotometryczne obserwacje gwiazd zmiennych z użyciem niewielkich przysłon fotometru [8]. Możliwe jest też otrzymanie technikami fotograficznymi lub z pomocą kamer CCD, nieporuszonych zdjęć przy długich czasach ekspozycji.
2. Po ustaleniu: $T_n \neq 0$, $T_g \neq 0$ możliwe są okresowe obserwacje dwóch fragmentów nieba. Wykorzystuje się one głównie w fotometrii gwiazd zmiennych. Poprzez częstą zmianę skierowania fotometrów z pozycji obserwowanej gwiazdy (pozycja *gwiazdy*) na tło nieba (pozycja *nieba*) można bowiem znacznie zredukować zakłócający wpływ jasności nieba na pomiar jasności gwiazdy.

Opisywany podprogram jest uruchamiany przez prowadzącego obserwacje. Ponadto, jeśli nie został utworzony zestaw obrazów wzorcowych, (procedura 5.2.2.1), podprogram tworzy go automatycznie. W przypadku nieutworzenia zestawu wzorców pomocniczych (procedura 5.2.2.3) działanie podprogramu polega wyłącznie na stabilizacji jednego położenia teleskopu (pozycja *gwiazdy*).

5.2.2.5. Podążanie teleskopu za ruchomymi obiektami.

Zmieniając współrzędne środków wszystkich obiektów obrazu wzorcowego oraz obrazów zbioru **W** w czasie, można uzyskać ruch teleskopu w ustalonym kierunku oraz o ustalonej prędkości. Staje się więc możliwe śledzenie takich ruchomych obiektów na niebie, których prędkość i kierunek ruchu są znane (dotyczy to zwłaszcza komet oraz planetoid).

Podprogram realizujący tę metodę jest wywoływany przez prowadzącego obserwację. Każdorazowo, po zapoczątkowaniu swojego działania, wywołując procedurę 5.2.2.1, tworzy zestaw wzorców obrazu nieba.

5.2.3. Oprogramowanie zarządzające.

Podstawową funkcją oprogramowania zarządzającego pracą systemu prowadzenia teleskopu jest uruchamianie podprogramów realizujących konkretne zadania prowadzenia teleskopu (poprzednie punkty). Ponadto umożliwia ono dokonanie pewnych operacji na obrazowych strukturach danych. Są to następujące operacje:

1. odczyt obrazu rastrowego z dysku, nie zaś z kamery;
umożliwia to testowanie działania algorytmów przetwarzania obrazów poza obserwatorium;
2. zapis aktualnego obrazu rastrowego na dysk;
3. zapis i odczyt z dysku struktury reprezentującej obraz wzorcowy oraz zbiór obrazów **W**; omawiana struktura obrazów odpowiada obrazom trzeciego etapu, czyli składa się ze zbioru wektorów obiektów (drugiego etapu) oraz z liczby $\bar{\rho}$ (średnie wydłużenie obiektów obrazu);
operacje te umożliwiają tworzenie bazy danych zawierającej układy gwiazd odpowiadające często obserwowanym fragmentom nieba;
jej wykorzystanie polepsza powtarzalność wyników obserwacji, oraz jest pomocne w identyfikacji fragmentów nieba;

5.2.4. Oprogramowanie realizujące zadanie komunikacji systemu prowadzenia z obserwATOREM.

Zestaw procedur zapewniających komunikację obserwatora z systemem komputerowym nosi nazwę interfejsu użytkownika. W zestawie tych procedur można wyodrębnić trzy zasadnicze grupy. Będą one omówione w kolejnych podpunktach. Ich wspólną cechą jest użycie jako środka komunikacji z obserwATOREM barwnej grafiki komputerowej o dużej rozdzielczości. Rozwiązanie to wiąże się wprawdzie z pewnymi trudnościami polegającymi na konieczności opracowania biblioteki oprogramowania graficznego działającego w wysoko

rozdzielczych (640×480, 800×600, 1024×768), 256 kolorowych trybach pracy karty grafiki SVGA¹⁷, jednak jest konieczne do prawidłowej wizualizacji obrazów.

5.2.4.1. Obsługa menu.

Wybór opcji programu, oraz wywoływanie podprogramów jest realizowane przez procedurę obsługi menu. Procedura ta, zgodnie z zasadą przyjaznego użytkownikowi oprogramowania (angl. *user freandly*) tworzy w środowisku graficznym system hierarchicznych okienek, ułatwiających wybór opcji. Fotografia 5.2 przedstawia przykładowy widok okienek menu.

5.2.4.2. Edycja wartości parametrów określających działanie procedur sterowania teleskopem.

Edycja parametrów procedur, oraz operacje ich zapisu i odczytu z dysku realizowane są przez specjalizowany, działający w środowisku graficznym program edycyjny.

5.2.4.3. Monitorowanie procesów przetwarzania obrazów.

Podgląd wartości zmiennych, oraz wizualizacja przetwarzanej informacji obrazowej ma ogromne znaczenie na etapie uruchamiania i testowania systemu. Dokonywana zmiana wektora przerwań [30] (podrozdział 5.2.1.7), oraz użycie 256 kolorowych trybów graficznych uniemożliwia bowiem zastosowanie standardowych programów uruchomieniowych (np. Turbo Debugger). Odpowiednia prezentacja informacji obrazowej ma również znaczenie w kontroli działającego systemu.

Aby ją osiągnąć podzielono ekran graficzny na pięć obszarów. Pierwszy (położony najniżej - fotografie 5.2-5.6) zarezerwowany jest dla obsługi menu, edytora parametrów, oraz wyświetlania informacji o stanie aktualnie wykonywanych funkcji prowadzenia. Na pozostałych czterech obszarach mogą być wyświetlane różne formy informacji obrazowej i tekstowej. Na przykład:

1. lista komunikatów; zawierająca komunikaty o rodzaju wywoływanych procedur oraz o zaistniałych błędach przetwarzania obrazów (fotografia 5.2-).
2. aktualny obraz rastrowy, wyświetlony w rzeczywistej skali szarości (fragmenty obrazu mogą być powiększane) (fotografia 5.3);
3. aktualny obraz, wyświetlony w pewnym zestawie kolorów przyporządkowanych stopniom szarości (sposób przyporządkowania można zmieniać) (fotografie 5.4-5.6);
4. obraz z punktu 2 lub 3 z naniesionymi pozycjami *gwiazdy* i *nieba* (fotografie 5.4-5.6);
5. obraz przedstawiający stablicowaną funkcję $I_{gr}'(i,j)$, określającą poziom tła (fotografia 5.2);

¹⁷Jak dotąd, nie istnieje powszechnie akceptowany standard obsługi rejestrów sterujących pracą karty SVGA (jest ona różna dla różnych typów kart SVGA). Fakt ten skutecznie hamuje powstawanie pakietów graficznych obsługujących wysokorozdzielcze tryby pracy karty.

6. symboliczna mapa usytuowania obiektów obrazu (aktualnego lub jednego z obrazów wzorcowych) (fotografia 5.6);
7. symboliczna mapa obrazu wskaźnikowego (fotografia 5.3).;
8. lista obiektów wybranego obrazu (aktualnego lub jednego z obrazów wzorcowych) (fotografia 5.4)
9. czas działania wybranego podprogramu (fotografia 5.2);
10. lista wartości parametrów wybranego podprogramu;
11. diagram przedstawiający aktualny kierunek i wartość sygnałów sterujących silnikami teleskopu (fotografia 5.6).

Powyższe formy informacji można wyświetlać w dowolnym z czterech obszarów ekranu (o ile pozwala na to jego wielkość) w trakcie działania określonych podprogramów.

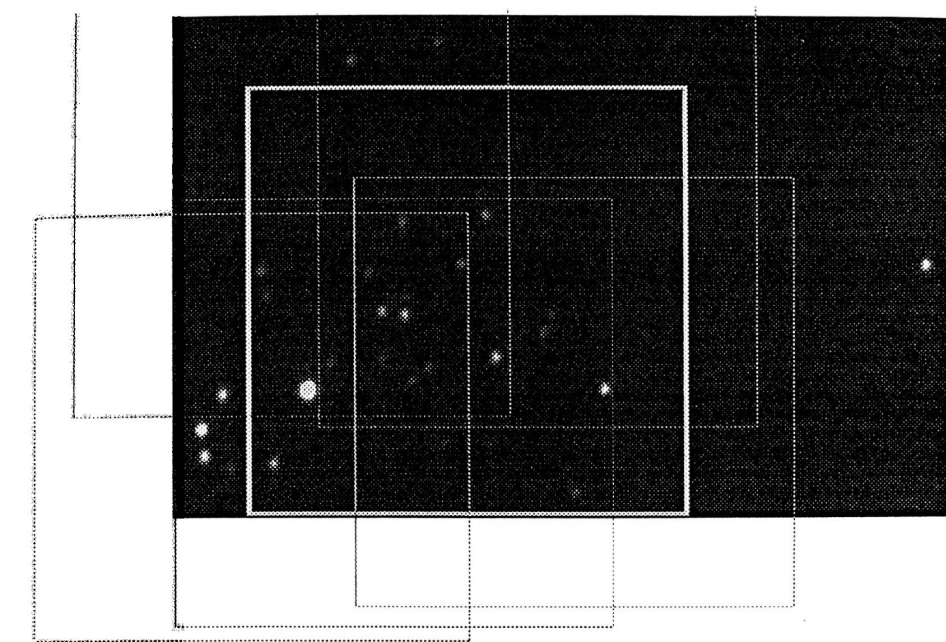
6. Prezentacja efektów pracy systemu prowadzenia.

Celem uwidocznienia możliwości systemu prowadzenia wykonano kamerą CCD zdjęcie pewnego fragmentu nieba. Przedstawia je rysunek 6.1.a. Rysunek 6.1.b jest natomiast zdjęciem tej samej okolicy nieba otrzymanym za pomocą kamery (typu *night-vision*) systemu prowadzenia. Jak widać kamera CCD ma większe pole widzenia, (fragment nieba obejmowany przez kamerę systemu prowadzenia zaznaczono na rysunku 6.1.a pogrubionym obramowaniem), oraz większą czułość (zjęcie wykonano przy 2 sekundowej ekspozycji). Wycinek nieba (6.1.b) posłużył następnie do utworzenia (przez wybór w menu odpowiedniego podprogramu) obrazu wzorcowego definiującego klasę K_1 . W następnej kolejności przeprowadzono eksperyment polegający na wyznaczeniu takich maksymalnych przesunięć teleskopu, dla których obrazy otrzymywane z kamery należą do klasy K_1 . Eksperyment przeprowadzono przy następujących wartościach parametrów: $r=3$ (4.13), $p_{gr}=0.6$ (4.21). Otrzymany zestaw maksymalnie przesuniętych obrazów zaznaczono na rysunku 6.1.a (każdy z obrazów jest obramowany cienką linią). Obszar nieba będący sumą zaznaczonych fragmentów można uważać za strefę przyciągania obrazu wzorcowego. Im większa jest ta strefa, tym większe błędy prowadzenia mogą być korygowane przez bardzo sprawnie działający nieliniowy regulator położenia (4.31)¹⁸. Jak widać na rysunku strefa przyciągania znacznie przekracza wielkość obrazu.

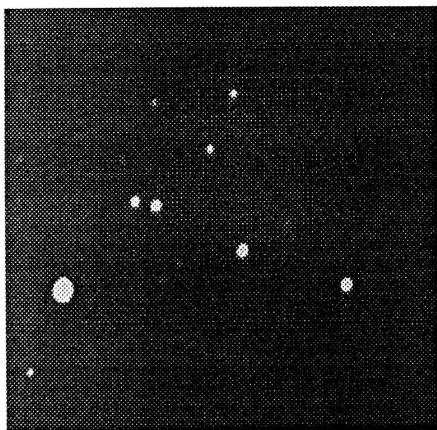
Opisywany eksperyment odzwierciedla typową sytuację obserwacyjną. Powstające w czasie obserwacji zakłócenia, mają przeważnie na tyle małą wartość, iż nie powodują wyjścia obrazu poza opisaną strefę.

Efekty pracy systemu prowadzenia są najbardziej widoczne, w czasie realizacji konkretnych zadań prowadzenia. Najczęściej wykorzystywaną w obserwatorium na Suhorze funkcją systemu jest stabilizacja położenia teleskopu, na przemian w dwóch określonych pozycjach (podrozdział 5.2.2.4, zadanie 2). Ten typ prowadzenia teleskopu (jak zostało powiedziane w rozdziale 5) wykorzystuje się w czasie fotometrycznych pomiarów jasności gwiazd zmiennych. Stabilizacja położenia teleskopu w pozycji *gwiazdy* umożliwia zastosowanie małych przysłon fotometru. Poprzez redukcję wpływu promieniowania tła nieba zwiększa się stosunek sygnału, rozumianego jako wartość dochodzącego do fotometru strumienia promieniowania badanej gwiazdy, do szumu (najistotniejszą składową szumu fotometru jest szum kwantowy związany z mierzonym promieniowaniem [9]). Równie istotnym efektem pracy systemu prowadzenia jest zautomatyzowanie "zjazdów" teleskopu na pozycję *nieba* (pomiar promieniowania tła nieba umożliwia odjęcie jego wartości od zmierzonej wartości promieniowania gwiazdy). Dotychczas, przesunięcia te przeprowadzane były (co kilka lub kilkadziesiąt minut) ręcznie. Obok naturalnego zmęczenia osób prowadzących obserwacje, dochodziło często (właśnie z powodu zmęczenia) do pominięcia "zjazdu" na pozycję *nieba*. W konsekwencji dochodziło do utraty dokładności pomiarów.

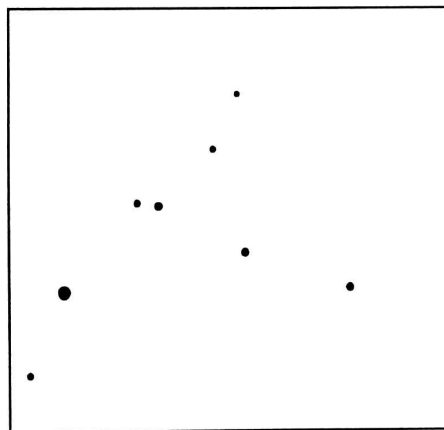
¹⁸Większe błędy prowadzenia (związane z obrazami należącymi do klasy K_2) korygowane są w dłuższym czasie.



a)



b)



c)

Rysunek 6.1

Ilustracja strefy przyciągania obrazu wzorcowego,

a) zdjęcie pewnej okolicy nieba uzyskane przez czulą kamerę CCD,

b) wycinek nieba widziany przez kamerę systemu prowadzenia, na podstawie którego został utworzony obraz wzorcowy,

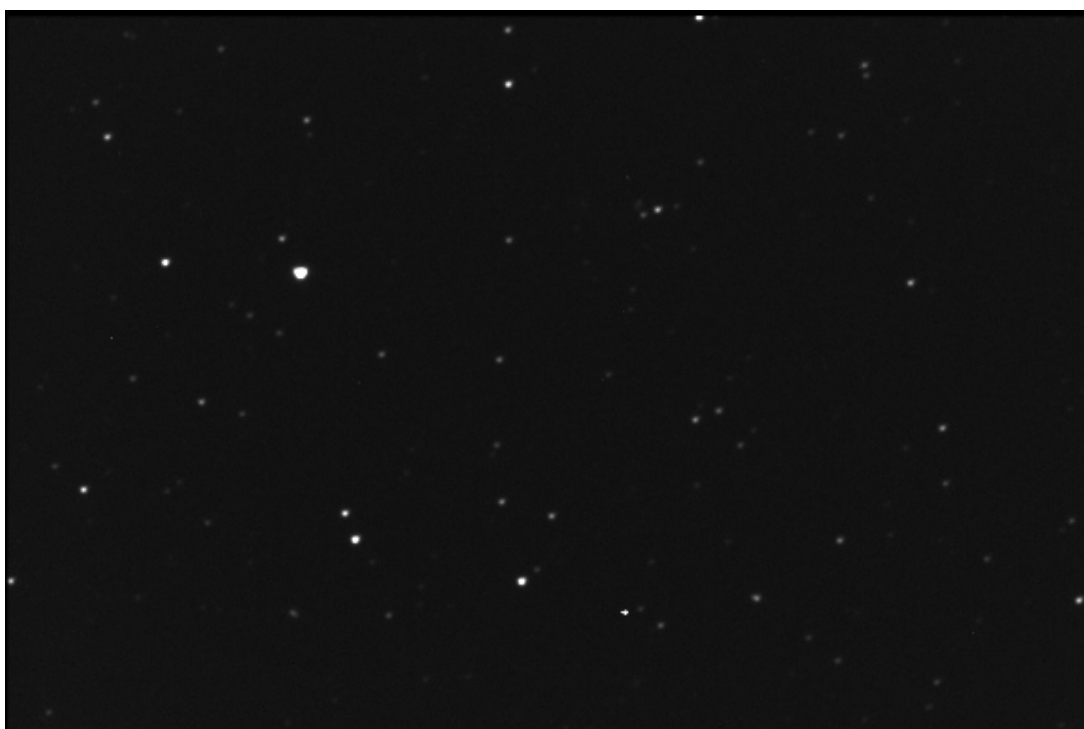
c) symboliczna ilustracja obiektów obrazu wzorcowego.

Pozytywny efekt pracy systemu jest bezpośrednio zauważalny w czasie realizacji prostych zadań stabilizacji położenia teleskopu. Rysunek 6.2.a przedstawia zdjęcie nieba wykonane kamerą CCD przy długiej 15 minutowej ekspozycji oraz wyłączonym wizyjnym systemie prowadzenia. Jak widać niedokładności działania podsystemu kompensacji ruchu obrotowego Ziemi doprowadziły do poruszenia obrazu gwiazd. Rysunek 6.2.b przedstawia analogiczne zdjęcie, eksponowane jednak przy działającym systemie prowadzenia. Jest ono pozbawione wad wcześniejszego.

Równie łatwo widoczne są efekty pracy systemu realizującego zadanie śledzenia ruchomych obiektów. Rysunek 6.3. przedstawia zdjęcie komety Shoemaker'a 1991a uzyskane w czasie 400 sekundowej ekspozycji kamerą CCD. Widoczne na zdjęciu poruszenie obrazu nieruchomych, okolicznych gwiazd, wskazuje na dużą prędkość fotografowanego obiektu.



a)



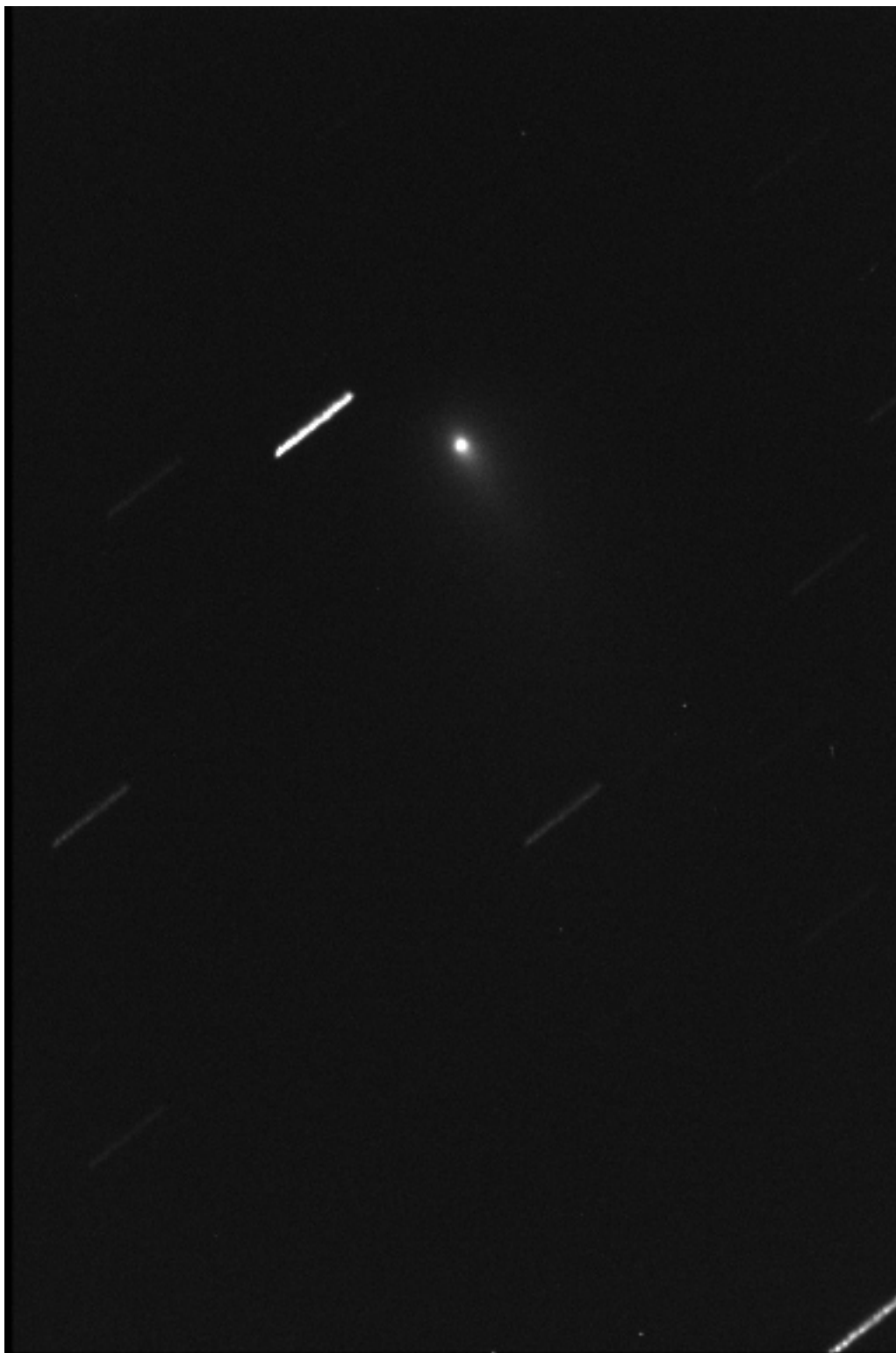
b)

Rysunek 6.2

Ilustracja efektu stabilizacji położenia teleskopu,

a) zdjęcie eksponowane przy nieaktywnym wizyjnym systemie prowadzenia

b) zdjęcie eksponowane przy włączonym systemie



Rysunek 6.3

Zdjęcie komety Shoemaker 1991a, uzyskane w czasie realizacji przez system prowadzenia zadania podążania za ruchomymi obiektami.

7. Podsumowanie.

W zasadniczej części (rozdział 4) przedstawionej pracy zaprezentowany jest sposób konstrukcji algorytmu rozpoznawania obrazów, który można wykorzystać w systemie sterowania ruchem teleskopu astronomicznego. Od jakości pracy algorytmu zależy w największym stopniu jakość pracy całego systemu prowadzenia teleskopu. Kryteria jakości pracy systemu były zatem podstawowym miernikiem oceny tworzonego algorytmu. Jak pokazano w rozdziale 4, system prowadzenia oparty o ostateczną postać algorytmu rozpoznawania obrazów spełnia wprowadzone kryteria jakości pracy. Dodatkowym potwierdzeniem powyższego faktu jest zawarta w rozdziale 6 prezentacja efektów działania systemu. Opisana w rozdziale 5 implementacja systemu pokazuje jednocześnie, iż budowa systemu wymaga relatywnie niskich kosztów, a jego obsługa jest możliwa nawet przez nieprzygotowanych do tego obserwatorów.

Udowodniona jest zatem podstawowa teza prezentowanej pracy, mówiąca iż:

Dzięki użyciu odpowiednich algorytmów przetwarzania obrazów jest możliwe skuteczne, polepszające jakość obserwacji i zmniejszające zaangażowanie człowieka, wykorzystanie komputerowego systemu wizyjnego w systemie sterującym ruchem teleskopu.

Jeszcze jednym potwierdzeniem tej tezy jest fakt, iż użycie uruchomionego w obserwatorium na Suhorze systemu, weszło na stałe do praktyki obserwacyjnej.

Ten pozytywny rezultat uzależniony był jednak od pomyślnego rozwiązania wielu problemów. Do najważniejszych z nich należą:

- definicja funkcji podobieństwa między obrazami p_1 , umożliwiająca niezawodne działanie systemu prowadzenia w warunkach dużego nagromadzenia gwiazd w obserwowanym fragmencie nieba;
- opracowaniu przez autora szybkiego algorytmu obliczania funkcji podobieństwa p_1 , (w systemach czasu rzeczywistego prędkość przetwarzania informacji ma decydujące znaczenie);
- wykazanie, iż (po zastosowaniu odpowiedniej metody), błąd wyznaczenia położenia środka gwiazdy może być wielokrotnie mniejszy od odległości między sąsiednimi pikselami użytego przetwornika obrazowego, oraz pozytywne zweryfikowanie tego faktu w praktyce;
- formalizacja problemu wyboru cech obrazu wykorzystująca pojęcia **obrazu** oraz **obiektu etapowego**, sprawiająca, iż relacje pomiędzy etapami rozpoznania stają się na tyle widoczne, iż: **możliwa jest prosta generacja nowych wariantów metody**, oraz **możliwa jest optymalizacja przetwarzania informacji obrazowej**. Zdaniem autora, formalizację tę można z bardzo pozytywnym skutkiem wykorzystać do opisu innych wieloetapowych systemów przetwarzania informacji obrazowej.

- zaprezentowana w pracy koncepcja **regulatora obrazu**, oraz powiązanie rodzaju użytych algorytmów sterowania teleskopu z wynikami procesu klasyfikacji obrazów (podrozdział 4.1) sprawiająca, iż opisywany system sterowania łatwo zaadoptować do realizacji nowych zadań prowadzenia teleskopu.

Ostatni z punktów umożliwia wyciągnięcie daleko idących wniosków.

Jak wynika z podrozdziału 4.5 owocem wykorzystania koncepcji regulatora obrazów było podanie bardzo użytecznych oraz zwięźle zdefiniowanych algorytmów realizujących konkretne zadania sterowania teleskopem. Fakt ten zachęca do tworzenia w oparciu o powyższą koncepcję nowych, niewykorzystanych dotąd sposobów prowadzenia teleskopu. Na przykład:

- algorytmu realizującego automatyczne wyszukiwanie zadanych obszarów nieba,
- algorytmu wykorzystującego zarówno zdania śledzenia ruchomych obiektów jak i zadania stabilizacji (na przemian), który może być wykorzystany w pomiarach fotometrycznych jasności komet z kalibracją fotometru w pozycji tła nieba (porównaj 5.2.2.4).

Zadania związane z wygenerowanymi w oparciu o koncepcję regulatora obrazów algorytmami powinny stać się tematem oddzielnych badań.

Stwierdzenie to, oraz fakt udowodnienia prawdziwości zasadniczej tezy pracy są zdaniem autora głównymi wnioskami z niej wynikającymi.

Dodatek 1

Ustalenie odwzorowania definiującego dyskretny regulator położenia teleskopu.

Badana będzie możliwość zastosowania regulatora proporcjonalnego bądź nieliniowego

D.1.1. Regulator proporcjonalny.

Regulator proporcjonalny opisuje się prostą zależnością [13]:

$$\begin{aligned}\Phi(e_i) &= k_r e_i, \\ \text{czyli: } u_{i+1} &= k_r e_i \\ \text{gdzie: } k_r &\text{ - pewna liczba rzeczywista.}\end{aligned}\tag{D.1.1}$$

D.1.2. Badanie stabilności oraz jakości regulacji układu z regulatorem proporcjonalnym.

Analiza układu regulacji przeprowadzona będzie z użyciem przekształcenia Z [10], przyporządkowującego funkcji dyskretnej $f(n)$, funkcję $F(z)$ zmiennej zespolonej z .

Rozważany jest układ regulacji impulsowej (rysunek 2.6) złożony z:

1. Impulsatora idealnego przekształcającego ciągłą funkcję $e(t)$ w ciąg impulsów:

$$e^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} e(n) \delta(t - nT_p) \tag{Z.1}$$

gdzie: $\delta(t - nT_p)$ - funkcja Diraca [10] przesunięta w prawo o n okresów impulsowania T_p

$e(n)$ - zdyskretyzowana [10] funkcja $e(t)$.

2. Członu reprezentującego regulator i obiekt regulacji.

Dla powyższego układu definiuje się **dyskretną transmitancję operatorową** następująco:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{E(z)} \tag{Z.2}$$

gdzie: $Y(z) = Z(y(n))$,

$y(n)$ - zdyskretyzowana funkcja sygnału wyjściowego,

$E(z) = Z(e(n))$.

Stosunek dyskretnej transformaty sygnału wyjściowego $Y(z)$ układu, do dyskretnej transformaty sygnału zadawanego $Y_0(z)$ nazywany jest dyskretną transmitancją zastępczą $G_z(z)$ układu zamkniętego.

W rozpatrywanym układzie zachodzi [10]:

$$G_z(z) = \frac{Y(z)}{Y_0(z)} = \frac{G(z)}{1+G(z)} \quad (Z.3)$$

gdzie: $Y_0(z) = \mathbf{Z}(y_0(n))$,

$y_0(n)$ - zdyskretyzowana funkcja sygnału zadającego.

Można wykazać [10], że transmitancja $G_z(z)$ jest funkcją wymierną, czyli:

$$G_z(z) = \frac{N(z)}{M(z)} = \frac{\sum_{i=0}^l b_i z^i}{\sum_{i=0}^k a_i z^i} \quad (Z.4)$$

gdzie: a_i, b_i - liczby rzeczywiste,

l, k - stopnie wielomianów licznika i mianownika.

Rozważany zamknięty układ regulacji impulsowej jest stabilny asymptotycznie, jeśli wszystkie pierwiastki z_i wielomianu $M(z)$ (równania charakterystycznego) spełniają warunek [10]:

$$|z_i| < 1. \quad (Z.5)$$

Sprawdzenie powyższego warunku wymaga oczywiście wyznaczenia konkretnych współczynników wielomianu $M(z)$. Wyznaczona więc być musi postać transmitancji dyskretnej $G(z)$. W osiągnięciu tego celu pomocne będzie wyznaczenie transmitancji operatorowej obiektu regulacji $G_b(s)$, zdefiniowanej w oparciu o przekształcenie Laplace'a [10].

Obiekt regulacji opisany układem równań różniczkowych (2.11) posiada transmitancję $G_b(s)$ postaci:

$$G_b(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{K_2}{s(1 + sT_2)} \quad (Z.6)$$

Przekształcając $G(s)$ do postaci sumy ułamków prostych otrzymuje się:

$$G_b(s) = \frac{A_1 s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} + \frac{A_2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} + \frac{A_3}{1 + sT_2} + \frac{A_4}{s} \quad (Z.7)$$

(wyrażenia określające stałe $A_1, \dots, A_4$ zawiera dodatek 1).

Przekształcenie $\mathbf{Z}$ oraz przekształcenie Laplace'a są liniowe, zatem transmitancję dyskretną $G_b(z)$ obiektu regulacji można znaleźć jako sumę transmitancji dyskretnych odpowiadających poszczególnym składnikom wzoru (Z.7).

Układowi o transmitancji:

$$\begin{array}{ll} \frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} & \text{odpowiada transmitancja dyskretna: } \frac{z^2 + B_1 z}{z^2 + B_2 z + B_3}, \\ \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} & \text{odpowiada : } \frac{B_4 z}{z^2 + B_2 z + B_3}, \\ \frac{1}{1 + T_2 s} & \text{odpowiada : } \frac{B_5 z}{z + B_6}, \\ \frac{1}{s} & \text{odpowiada : } \frac{z}{z - 1} \quad [33], \end{array}$$

(wyrażenia określające stałe $B_1, \dots, B_6$ zawiera dodatek 2).

A zatem, po odpowiednim zsumowaniu prawych stron powyższych zależności otrzymuje się wyrażenie będące transmitancją dyskretną obiektu. Doprowadzając je do postaci funkcji wymiernej otrzymuje się:

$$G_b(z) = \frac{C_4 z^4 + C_3 z^3 + C_2 z^2 + C_1 z}{M_4 z^4 + M_3 z^3 + M_2 z^2 + M_1 z + M_0} \quad (Z.8)$$

(wyrażenia określające stałe $C_1, \dots, C_4, M_0, \dots, M_4$ zawiera dodatek 1).

Działanie regulatora proporcjonalnego jest opóźnione o jeden okres próbkowania. Transformata $\mathbf{Z}$ funkcji $f(n-k)$, opóźnionej o k okresów próbkowania w stosunku do funkcji $f(n)$, spełnia zależność [10]:

$$\mathbf{Z}(f(n-k)) = z^{-k} \mathbf{Z}(f(n)) \quad (Z.9)$$

Można zatem łatwo wyznaczyć transmitancję dyskretną obiektu regulacji wraz z regulatorem proporcjonalnym ($u_{i+1} = f(e_i) = k_r e_i$). Jest ona równa:

$$G(z) = k_r z^{-k} G_b(z) \quad (Z.10)$$

Na jej podstawie wyznacza się transmitancję $G_z(z)$, a co za tym idzie równanie charakterystyczne całego układu regulacji.

Równanie to ma postać:

$$M_4 z^4 + (M_3 + C_4 k_r) z^3 + (M_2 + C_3 k_r) z^2 + (M_1 + C_2 k_r) z + M_0 + C_1 k_r = 0 \quad (2.25)$$

Znając równanie charakterystyczne można zbadać stabilność układu regulacji wykorzystując kryterium Jury [10]. Stosując powyższe kryterium należy wyznaczyć wartość dwóch wyznaczników mających stopień o jeden mniejszy od stopnia równania charakterystycznego. Dla rozpatrywanego układu (równanie charakterystyczne jest stopnia czwartego) wykorzystanie kryterium Jury nie jest uciążliwe obliczeniowo.

Przed zastosowaniem opisanej metody badania stabilności układu należy oczywiście dokonać identyfikacji wszystkich parametrów obiektu regulacji. Zgodnie z (2.11) są to parametry: ζ , ω_n , T_2 , K_2 .

Specyfika obiektu regulacji - teleskopu, wyposażonego w czułą aparaturę badawczą, sprawia, iż nie można zastosować wielu powszechnie znanych [33] metod identyfikacji. W niektórych jednak przypadkach właśnie ta aparatura jest pomocna w wyznaczeniu parametrów obiektu.

Dodatek 3 zawiera opis zastosowanych metod identyfikacji parametrów, wraz z oszacowaniem ich dokładności.

W opisywanym modelu układu impulsowego (rysunek 2.6) zakłada się brak tzw. **elementów formujących** [10]. Oznacza to, iż nieciągły sygnał z impulsatora idealnego po przejściu przez regulator (który nie zmienia jego nieciągłego charakteru) kierowany jest wprost na wejście obiektu regulacji. Jest to bliskie stanowi faktycznemu, w którym na wejście obiektu regulacji kierowany jest sygnał w postaci ciągu impulsów o modulowanej szerokości. Odpowiedź obiektu regulacji, zawierającego układ całkujący z inercją, będzie bowiem podobna przy wymuszeniach w postaci ciągu impulsów Diraca (model) i ciągu impulsów o zmodulowanej szerokości (stan faktyczny)¹⁹. Różnice w odpowiedziach maleją do zera przy zmniejszaniu się długości impulsów, czyli przy zmniejszaniu się sygnału błędu.

Opisany w bieżącym podrozdziale sposób badania stabilności jest więc dokładny dla małych wartości sygnałów. Pozytywny wynik badania powyższą metodą stanowi więc tylko warunek konieczny stabilności układu.

2.3.1.2. Badanie jakości regulacji regulatora proporcjonalnego.

¹⁹ Odpowiedzi bezinercyjnego członu całkującego są identyczne

Oprócz stabilności, układ regulacji spełniać musi pozostałe kryteria jakości (2.1), (2.2), (2.3), (2.6). Aby rozstrzygnąć ich spełnienie należy wyznaczyć odpowiedzi układu regulacji na kilka, specjalnie dobranych sygnałów zadających. Odpowiedzi te można wyznaczyć dokonując odwrotnej transformaty Z wyrażenia $Y_0(z)G_z(z)$. Jak zostało jednak wcześniej stwierdzone, dla dużych sygnałów zadających, odpowiedzi mogą być wyznaczone z pewnymi błędami.

Równania opisujące układ regulacji (2.11 oraz D.1.1) można przedstawić w postaci układu równań różniczkowych zwyczajnych :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -\omega^2 x_1 - 2\zeta\omega_n x_2 + \omega_n^2 x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} = x_4 \\ \frac{dx_4}{dt} = -\frac{1}{T_2} x_4 + \frac{K_2}{T_2} u \end{cases} \quad (D.1.2)$$

Przy znanych warunkach początkowych, oraz znanej postaci funkcji u układ ten można rozwiązać numerycznie. Funkcję u definiuje się w ten sposób, by symulowała działanie rzeczywistego regulatora impulsowego:

$$u(e(t), t) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(\tau) \cdot U_h & \text{dla } t < iT_p + l \\ 0 & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases} \quad (D.1.3)$$

gdzie: $i = \operatorname{int}(t/T)$;

$\operatorname{int}(x)$ - największa liczba całkowita mniejsza od x ;

$\operatorname{sgn}(x)$ - znak liczby x ;

$\tau = k_r e((i-1)T_p)/U_h$;

$l = |\tau|$ - szerokość impulsu;

U_h - wysokość impulsu,

przy czym $U_h < U_{\max}$; (D.1.4)

$U_{\max}$ - maksymalna dopuszczalna wysokość impulsu,
uzależniona od konstrukcji silników oraz ich sterownika;

Podana funkcja generuje opóźnione o jeden okres sygnały impulsowe, o czasie trwania i znaku zależnym od wartości funkcji błędu $e(t)$.

Szerokość impulsów normalizowana jest w ten sposób, by całka z impulsu odpowiadającemu wartości $e=1$, $k_r=1$ w przedziale zawierającym impuls, miała wartość 1 (zgodność z impulsem Diraca)

Dysponując odpowiedzią układu regulacji na dowolne wymuszenie, a zatem mając do dyspozycji wartość błędu $e(t)$ w dowolnej chwili czasu, można sprawdzić spełnienie przez układ zadanych kryteriów jakości. A zatem:

1. Spełnienie kryterium dokładności statycznej (2.2) można rozstrzygnąć wyznaczając wartość $e(t)$ przy stałym sygnale zadającym, po odpowiednio długim czasie.
2. Spełnienie kryterium dokładności dynamicznej (2.3) rozstrzyga się poprzez badanie odpowiedzi układu na sygnał liniowo narastający z prędkością v_n .
3. Spełnienie kryterium wymaganej prędkości działania i wrażliwości na zakłócenia sprawdza się badając odpowiedzi układu na wymuszenia skokowe o wartościach określonych parami (2.6).

Określone tabelą 2.1 parametry jakościowe dotyczą całego układu prowadzenia, uwzględniają więc również wpływ błędów pomiaru wartości położenia. Jednocześnie, w obecnym modelu założono, iż błędy te są równe zero. Chcąc je uwzględnić, należy odpowiednio zwiększyć wymagania stawiane algorytmowi regulacji. A zatem wartości błędów: e_s , e_n , e_k , e_{zk} , e_p (podrozdział 2.1) należy zmniejszyć o maksymalną wartość błędu pomiaru. Jego wartość, która będzie oszacowana w podrozdziale 3.2.1.1 wynosi poniżej 0.25 sekundy kątownej.

Tabela D.1.1 przedstawia zmodyfikowane w powyższy sposób parametry jakości układu regulacji.

dokładność statyczna	dokładność dynamiczna przy $v_n=0.4''/s$	prędkość działania i wrażliwość na zakłócenia przy $e_k'=e_{zk}'=0.2''$		niezawodność pracy przy $e_p'=0.2''$
$e_s' = 0.2''$	$e_n' = 0.2''$	przesunięcie 6" 3.5" 2" 1" 0.5"	czas 4 s 2.9 s 1.3 s 1.1 s 0.9 s	$v_{gr}=2.31 \cdot 10^{-5} 1/s$

Tabela D.1.1 Zmodyfikowane parametry jakości pracy układu regulacji.

D.1.3. Wyznaczenie parametrów regulatora proporcjonalnego.

Niech pewien układ regulacji spełnia, badane z pomocą numerycznych rozwiązań układu równań różniczkowych, kryteria jakości (tabela 2.2). Oznacza to, iż przebiegi

chwilowe sygnału wyjściowego zmierzają do wartości poniżej poziomu zadanych błędów. Jednocześnie zadane poziomy błędów są na tyle małe, iż dla sygnałów nie większych od nich, można stosować opisaną w podrozdziale 2.3.1.1 metodę badania stabilności. Metoda badania jakości jest więc uzupełnieniem metody badania stabilności układu. Obie metody należy zatem stosować łącznie.

Przedmiotem obecnego podrozdziału jest problem doboru parametru k_r regulatora (2.14). Zastosowana w układzie modulacja szerokości impulsów powoduje dodatkowo konieczność określenia ich wielkości U_h (wzór 2.27).

W najprostszej z numerycznego punktu widzenia metodzie, wyznacza się w pewnym, arbitralnie wybranym przedziale zmienności parametrów k_r, U_h ; n równoodległych węzłów. Następnie, w każdym z nich bada jakość i stabilność układu.

W przeprowadzonych obliczeniach numerycznych przyjęto:

1. przedział zmienności : $k_r \in (0,3)$;
2. przedział zmienności : $U_h \in (0,100)$;
3. $n = 3000$.

Układ równań różniczkowych D.1.2 rozwiązywano metodą Rungego-Kutty²⁰[34] czwartego rzędu. Obliczenia przeprowadzono z pomocą specjalnie napisanego do tego celu programu.

Jak wykazały obliczenia, dla żadnej pary parametrów k_r, U_h regulator nie spełnia wszystkich kryteriów jakości. Tabela D.1.2. przedstawia obliczone w drodze symulacji wartości parametrów jakości regulacji dla $k_r = 0.12$ V/sekunda kątowna (zgodnie z uwagami zawartymi w dodatku 2 przesunięcie teleskopu mierzone jest w sekundach kątowych), $U_h = 8.6$ V.

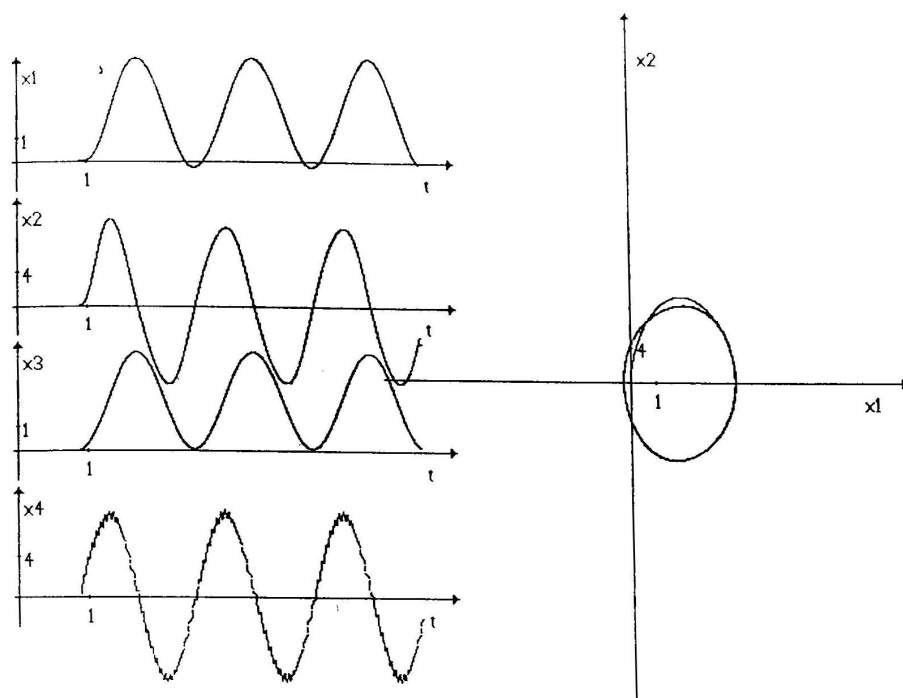
²⁰Przy kroku całkowania równym 0.00015, jego zmiany +/-50 % wpływają na rozwiązanie w postaci czasów odpowiedzi układu w ten sposób, iż zmienia się ono tylko w zakresie +/-0.1% .Można zatem uważać, iż przy tej wartości kroku uzyskuje się rozwiązanie bliskie dokładnemu. W obliczeniach przyjęto wartość kroku 0.0008. Przy tej wartości rozwiązania różnią się od uważanych za dokładne o mniej niż 0.5% .

Dokładność statyczna	dokładność dynamiczna przy $v_n=0.4''/s$	prędkość działania i wrażliwość na zakłócenia przy $e_k'=e_{zk}'=0.2''$	
$e_s' = 0.015''$	$e_n'=0.093''$	przesunięcie	czas
		6"	3.09 s
		3.5"	2.92 s
		2"	2.01 s
		1"	1.65 s
		0.5"	1.26 s

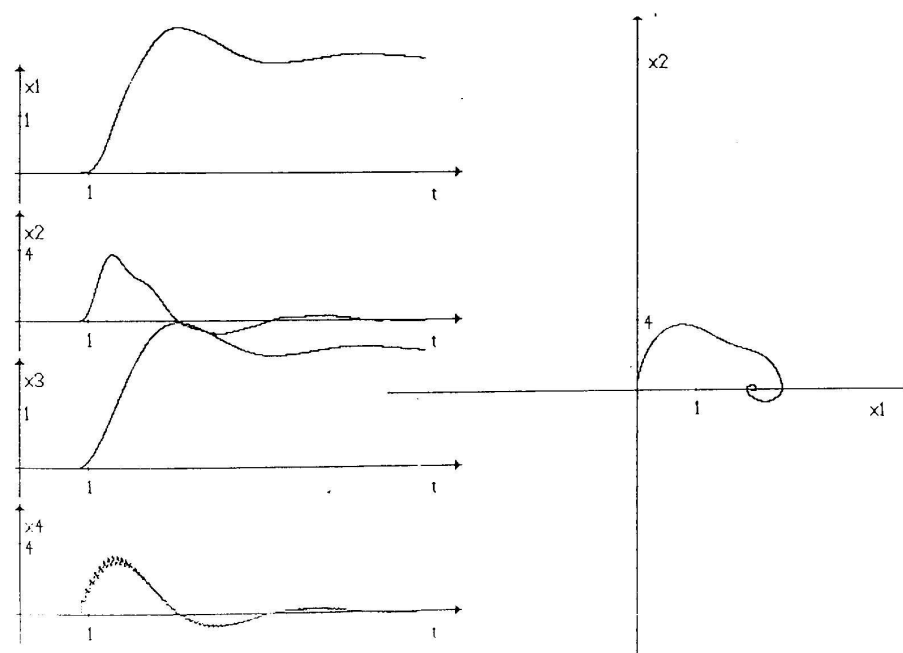
Tabela D.1.2 Wyznaczone w wyniku symulacji wartości parametrów jakości pracy regulatora proporcjonalnego

Przy podanych wartościach, regulator jest najbliższy spełnienia kryteriów jakości. Porównując tabele D.1.1 oraz D.1.2 łatwo zauważyć, iż z pięciu zadanych maksymalnych czasów regulacji, tylko w jednym przypadku (przesunięcie=4"), czas odpowiedzi układu ma wartość poniżej wartości zadanej. Rysunki D.1.1. i D.1.2 obrazują charakter odpowiedzi układu z regulatorem proporcjonalnym na wymuszenia skokowe. Pierwszy zawiera trajektorię fazową oraz charakterystyki czasowe układu na granicy stabilności ($k_r=0.27$), drugi natomiast przedstawia układ najbliższy spełnienia kryteriów jakości ($k_r=0.12$).

Wobec niespełnienia przez układ z regulatorem proporcjonalnym kryteriów jakości pracy, zachodzi potrzeba znalezienia algorytmu regulacji spełniającego powyższe kryteria.



I Rysunek D.1.1
 (Odpowiedzi skokowe układu sterowania z regulatorem proporcjonalnym
 (układ na granicy stabilności).



Rysunek D.1.2
 Odpowiedzi skokowe układu sterowania z regulatorem proporcjonalnym
 (układ będący najbliżżej spełnienia kryteriów jakości regulacji).

D.1.4. Regulator nieliniowy.

Punktem wyjścia dalszych rozważań będzie liniowa postać odwzorowania Φ , definiującego regulator. W algorytmach działających w sposób ciągły oznacza to najczęściej, iż $\Phi(t)$ jest następującej postaci (regulator PID [13]) :

$$\Phi(t) = k_r \left(e(t) + 1/T_s \int_0^t e(t) dt + T_w \frac{de(t)}{dt} \right) + \Phi(0) \quad (D.1.5)$$

gdzie: k_r , T_s , T_w - stałe rzeczywiste;

$\Phi(0)$ - początkowa wartość funkcji sterującej.

(schemat ten ogranicza się do uwzględnienia tylko pierwszej pochodnej funkcji błędu, oraz jej pojedynczej całki).

W cyfrowych (dyskretnych) wersjach powyższego algorytmu zastępuje się operacje całkowania sumowaniem, a różniczkowanie obliczaniem różnic pierwszego rzędu [13].

Zatem:

$$\Phi_{i+1} = k_r \left(e_i + T_p / T_s \sum_{k=1}^i e_k + T_w / T_p (e_i - e_{i-1}) \right) + \Phi(0) \quad (D.1.6)$$

gdzie: k, i - liczby całkowite

Powyższy algorytm ma szereg zalet. Uzależniając sygnał wyjściowy od różnicy pierwszego rzędu umożliwia szybką reakcję na zmiany sygnału, zaś występująca w wyrażeniu suma działa stabilizująco oraz sprowadza błąd ustalony do zera.

Rozwinięciem tej idei jest regulator o postaci.

$$\Phi_{i+1} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \leq i+1}}^n w_k e_{i-k+1} \quad (D.1.7)$$

gdzie: i, n - liczby całkowite,

w_k - współczynniki rzeczywiste.

Poprzez dobór współczynników wagowych $w_1, w_2, \dots, w_n$ regulator ten może uwzględniać wartości różnic wyższych rzędów.

Techniczna realizacja powyższego algorytmu jest bardzo prosta, dla policzenia wyrażenia D.1.7 wystarczy pamiętać wartości błędów z n poprzednich okresów. Podobnie prostą realizację może mieć algorytm, w którym składniki sumy (D.1.7) zastępuje się pewnymi funkcjami błędu. Powstały w ten sposób regulator można zdefiniować analogicznym wzorem:

$$\Phi_{i+1} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \leq i+1}}^n \psi_k(e_{i-k+1}) \quad (\text{D.1.8})$$

gdzie: $\psi_k: R \rightarrow R; k=1,2,\dots,n$

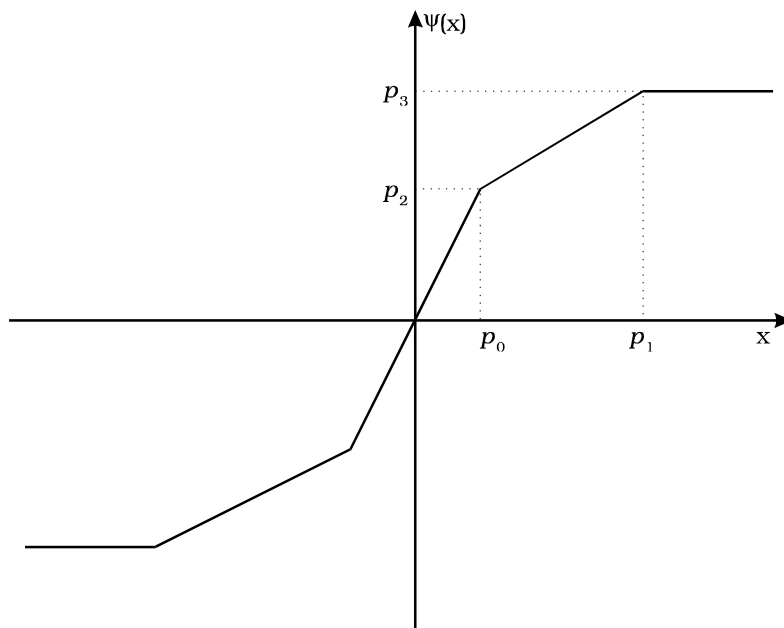
Funkcje ψ_k : muszą mieć tę postać, aby z jednej strony możliwe było szybkie wyznaczenie ich wartości, oraz z drugiej strony, by mogły odzwierciedlać pewne pożądane nieliniowości (zmiana nachylenia charakterystyki, strefa nieczułości, strefa nasycenia). Jedną z takich funkcji jest odwzorowanie zdefiniowane następująco:

$$\psi(x) = \begin{cases} xp_2/p_0 & \text{gdy: } |x| < p_0 \\ (x-p_0)(p_3-p_2)/(p_1-p_0) + p_2 & \text{gdy: } x \geq 0 \wedge |x| \geq p_0 \wedge |x| < p_1 \\ (x-p_0)(p_3-p_2)/(p_1-p_0) - p_2 & \text{gdy: } x < 0 \wedge |x| \geq p_0 \wedge |x| < p_1 \\ \text{sgn}(x)p_3 & \text{gdy: } |x| \geq p_1 \end{cases} \quad (\text{D.1.9})$$

gdzie: p_0, p_1, p_2, p_3 - ustalone rzeczywiste współczynniki

przy czym: $p_0, p_1 > 0; p_0 < p_1$.

Jak widać, powyższa funkcja powstaje poprzez "sklejenie" funkcji liniowych. Jej przykładowy przebieg zawiera rysunek D.1.3.



Rysunek 2.8
Przykładowy przebieg funkcji $\psi(x)$.

Przedmiotem następnego podrozdziału jest badanie jakości regulatora działającego zgodnie z algorytmem D.1.8 wykorzystującym powyższą postać funkcji ###.

D.1.5. Badanie stabilności układu z regulatorem nieliniowym.

Badanie stabilności asymptotycznej układu z regulatorem opisanym zależnością (D.1.3) przeprowadzone będzie w podobny sposób, jak miało to miejsce w przypadku regulatora proporcjonalnego.

Stwierdzono, iż sposób ten jest dokładny tylko dla niewielkich wartości sygnału błędu. Jednocześnie, właśnie dla niewielkich sygnałów regulator (2.31) zbudowany w oparciu o funkcje postaci (2.32) jest liniowy.

Wyrażenie definiujące regulator ma wówczas postać:

$$u_{i+1} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \leq i+1}}^n p_2^k / p_0^k e_{i-k+1} \quad |e_{i-k+1}| < p_0^k \quad (D.1.10)$$

gdzie: p_0^k, p_2^k - współczynniki p_0, p_2 k -tej funkcji ψ (2.32).

W liniowym układzie można już stosować użytą w podrozdziale 2.3.1.1 metodę badania stabilności. W pierwszej kolejności należy wyznaczyć transmitancję dyskretną $G'(z)$ obiektu regulacji wraz z regulatorem (2.31). Wykorzystując

obliczoną postać transmitancji obiektu $G_b(z)$ (2.22) oraz twierdzenie o transformacji funkcji przesuniętej (2.23) otrzymuje się:

$$G'(z) = G_b(z) \sum_{k=1}^n p_2^k / p_0^k z^{-k} \quad (\text{Z.11})$$

Podstawiając powyższe wyrażenie do wyrażenia określającego transmitancję układu zamkniętego (2.17) :

$$G'_z(z) = \frac{G'(z)}{1+G'(z)}$$

znajduje się szukane równanie charakterystyczne, na którego podstawie, (podobnie jak w podrozdziale 2.3.1.1) korzystając z kryterium Jury można wyznaczyć stabilność układu regulacji.

Równanie charakterystyczne ma następującą postać:

$$\left(\sum_{k=0}^4 M_k z^k + \sum_{k=1}^4 C_k z^k \cdot \sum_{k=1}^n p_2^k / p_0^k z^{-k} \right) z^{n-1} = 0 \quad (\text{Z.12})$$

Przykładowo, dla $n=4$ otrzymuje się:

$$\begin{aligned}
& (M_4) && z^7 \\
& + (M_3 + C_4 k_1) && z^6 \\
& + (M_2 + C_4 k_2 + C_3 k_1) && z^5 \\
& + (M_1 + C_4 k_3 + C_3 k_2 + C_2 k_1) && z^4 \\
& + (M_0 + C_4 k_4 + C_3 k_3 + C_2 k_2 + C_1 k_1) && z^3 \\
& + (C_3 k_4 + C_2 k_3 + C_1 k_2) && z^2 \\
& + (C_2 k_4 + C_1 k_3) && z \\
& + (C_1 k_4) && = 0
\end{aligned} \tag{Z.13}$$

D.1.5.1. Badanie jakości regulacji regulatora nieliniowego.

Również powyższy problem rozwiązuje się, podobnie jak w przypadku regulatora proporcjonalnego, poprzez numeryczną symulację przebiegów układu. W wyrażeniu określającym sposób symulacji regulatora impulsowego, należy tylko odpowiednio zmienić zależność szerokości impulsu od sygnału błędu.

A zatem:

$$\tau = 1/U_h \sum_{\substack{k=1 \\ k \leq i+1}}^n \psi_k(e(T_p(i-k+1))) \quad (\text{D.1.10})$$

$l = |\tau|$ - czas trwania impulsu
(oznaczenia jak w 2.27).

D.1.6. Wyznaczenie parametrów regulatora nieliniowego.

Parametry rozpatrywanego regulatora określone są poprzez wielkość U_h , będącą wysokością impulsu (D.1.10) (zob. także 2.3.1.3), oraz poprzez zbiór współczynników funkcji ψ_k (D.1.10) dla $k=1,2,\dots,n$. Niech dla ustalonej ilości n , zbiór parametrów regulatora tworzy wektor:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots) = (U_h, p_0^1, p_1^1, p_2^1, p_3^1, p_0^2, p_1^2, p_2^2, p_3^2, \dots, p_0^n, p_1^n, p_2^n, p_3^n) \quad (\text{D.1.11})$$

Zadanie doboru parametrów polega na wyznaczeniu takiego wektora $\mathbf{x}_s$, aby układ regulacji spełniał kryteria jakości, oraz kryterium stabilności (zgodnie z uwagami zawartymi w punkcie 2.3.1.3 układ uważany jest za stabilny, gdy spełnia dodatkowo kryteria jakości).

Ilość parametrów regulatora (równa $4n+1$) sugeruje, iż istnieje wiele wektorów $\mathbf{x}_s$ spełniających powyższe kryteria²¹. Po wyznaczeniu pewnej ilości takich wektorów należy podać kryterium rozstrzygające o wyborze jednego z nich. Kryterium to ma dokonać wyboru najlepszego z rozwiązań, zatem naturalne jest powiązanie jego postaci ze znanymi już kryteriami jakości układu regulacji (2.2, 2.3, 2.6). Zadanie to spełnia prosta funkcja kryterialna $Q(\mathbf{x})$:

²¹Naturalnie, przy jednym parametrze k_r regulatora proporcjonalnego, również możliwa była taka sytuacja

$$Q(\mathbf{x}) = \beta_1 t^* + \beta_2 e_s^* + \beta_3 e_n^* \quad (\text{D.1.12})$$

gdzie

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ - ustalone liczby rzeczywiste.

t^* - średni ważony czas odpowiedzi układu na sygnały skokowe zdefiniowane w (2.6), czyli

$$t^* = \frac{\sum_{i=1}^k \hat{w}_i t_i}{\sum_{i=1}^k \hat{w}_i}$$

gdzie: $\hat{w}_i$ - waga określająca udział czasu odpowiedzi układu na k -ty sygnał skokowy w średnim czasie;

k - ilość zadawanych sygnałów skokowych (zgodnie z D.1.1)

e_s^* - błąd statyczny (2.2) układu regulacji, policzony dla wektora $\mathbf{x}$ parametrów regulatora w drodze symulacji numerycznej;

e_n^* - błąd dynamiczny;

Zadanie syntezy odpowiedniego regulatora można zatem sprowadzić do optymalizacji funkcji $Q(\mathbf{x})$ w przestrzeni takich wektorów $\mathbf{x}$ parametrów regulatora, dla których spełnia on warunki jakości i stabilności.

Modyfikacja funkcji Q zdefiniowana następująco:

$$Q^{\odot}(\mathbf{x}) = \begin{cases} Q(\mathbf{x}); & \text{gdzyregulatoro} \text{parametr} \mathbf{x} \text{spełnia kryteria jakości i niezawodności;} \\ M; & \text{w przeciwnym razie} \end{cases} \quad (\text{D.1.13})$$

gdzie: M - odpowiednio duża liczba rzeczywista, to znaczy:

$$M > \max_{z \in \mathbf{R}^{4n}} Q(z)$$

pozwala na zastosowanie wybranej metody optymalizacji w całej przestrzeni dopuszczalnych parametrów regulatora. Jedyne ograniczenia polegają na konieczności spełnienia warunków określonych w (2.32) oraz (2.28), czyli:

$$(p_0^k, p_1^k > 0; p_0^k < p_1^k; k = 1, 2, \dots, n) \wedge (U_h < U_{\max}) \quad (\text{D.1.14})$$

Dalsze rozważania przeprowadzone będą przy założeniu, iż ilość okresów próbkowania na podstawie których wyznacza się sterowanie jest równa $n=4$.

Dobór parametrów regulatora polega zatem na znalezieniu minimum funkcji Q' , $m=17$ zmiennych, z ograniczeniami D.1.14.

Łatwo sprawdzić, że funkcja Q' :

1. nie jest unimodalna (ma więcej niż jedno ekstremum),
2. nie jest ciągła (nieciągłość nie tylko dotyczy granicy obszarów spełniania kryteriów jakości i stabilności, ale również wynika z nieciągłości czasu regulacji w funkcji parametrów).

Funkcje o powyższych cechach są jednymi z najtrudniejszych do optymalizacji. Nie można bowiem stosować żadnych szybkozbieżnych metod gradientowych [36]. Przeważnie wykorzystuje się różne modyfikacje metody opartej o przegląd zbioru możliwych argumentów.

Niech pierwotny obszar poszukiwań J_0 zdefiniowany jest następująco:

$$J_0 = \{ \mathbf{x} \in \mathbf{R}^m : a_i < x_i < b_i; \quad i = 1, 2, \dots, m \} \quad (D.1.15)$$

gdzie: x_i - i -ta współrzędna wektora parametrów $\mathbf{x}$.

a_i, b_i - ustalone liczby rzeczywiste.

Ponadto, niech spośród s specjalnie dobranych punktów (wektorów) powyższego obszaru, $\mathbf{x}^0$ jest punktem, w którym wartość funkcji kryterialnej jest najmniejsza. Wokół $\mathbf{x}^0$ można zdefiniować nowy obszar:

$$J_1 = \{ \mathbf{x} \in \mathbf{R}^m : a_i' < x_i < b_i'; \quad i = 1, 2, \dots, m \} \quad (2.43)$$

$$\text{gdzie: } a_i' = x_i^0 - r(b_i - a_i),$$

$$b_i' = x_i^0 + r(b_i - a_i),$$

$r \in (0,1)$ - współczynnik redukcji długości przedziałów.

Dla obszaru tego można powtórzyć opisaną czynność generując nowy obszar, itd.

Zasadniczym problemem jest dobór s wektorów, w których oblicza się wartość funkcji. Punkty te można wybierać tak, by leżały w węzłach m -wymiarowej siatki (odległości pomiędzy węzłami siatki są najczęściej stałe). Przyjmując, iż w celu wyszukania lokalnych minimów należy w każdym z przedziałów $\langle a_i, b_i \rangle$ wyznaczyć k punktów, ilość węzłów m -wymiarowej sieci jest równa k^m .

Nawet przy $k=4$ otrzymuje się dla $m=16$ (ilość parametrów regulatora) $94.29 \cdot 10^9$ punktów. Ilość ta sprawia, iż przy czasie obliczania jednej wartości funkcji Q' rzędu sekund, optymalizacja tą drogą nie jest możliwa.

Zadanie optymalizacji parametrów regulatora posiada pewną specyfikę: można uważać je za rozwiązane w momencie znalezienia jednego wektora $\mathbf{x}$ takiego że $Q'(\mathbf{x}) < M$. Oczywiście można kontynuować poszukiwania, uzyskując regulatory o lepszej jakości. Niestety w poszukiwaniach tych, opisana wcześniej metoda jest

mało przydatna. Może bowiem upłynąć wiele czasu, nim systematycznie przeglądając wektory parametrów natrafi się na wektor spełniający warunek $Q'(x) < M$. Możliwa jest też sytuacja, w której zmieniając argumenty o dość znaczny krok (w opisywanym wyżej przypadku tylko czterokrotnie mniejszy od długości przedziału) odpowiedni wektor się ominie.

Powyższych wad nie ma metoda losowego wyboru w punktów w odpowiednich obszarach.

Aby ją efektywnie użyć, należy jak najbardziej usprawnić sposób liczenia funkcji kryterialnej. W trakcie jej obliczania kilkakrotnie wyznacza się rozwiązanie układu równań różniczkowych, oraz oblicza wartość dwóch wyznaczników stopnia $n+3$ (równanie charakterystyczne jest stopnia $n+4$; kryterium Jury wymaga obliczenia wyznaczników stopnia o jeden mniejszych). Jednokrotne rozwiązanie układu równań różniczkowych trwa około 0.5 sekundy²². Natomiast obliczenie wyznacznika poprzez rozkład macierzy na macierz trójkątną dolną oraz trójkątną górną (LU) wymaga rzędu $3(n+3)^2$ [34] operacji arytmetycznych, czyli trwa około 0.0002 sekundy²³. Rozpoczęcie zadania obliczania wartości funkcji kryterialnej Q' od sprawdzenia warunku stabilności układu, powoduje zatem, w wypadku jego niespełnienia, szybkie określenie wartości funkcji.

Obliczenia przeprowadzono dla wartości stałych $\beta_1, \beta_2, \beta_3, w_1, w_2, w_3, w_4, w_5$ ($k=5$) (D.1.12) przedstawionych w tabeli D.1.3.

$\beta_1=1$	$\beta_2=9$	$\beta_3=3$	$w_1=0.5$	$w_2=0.7$	$w_3=0.85$	$w_4=1$	$w_5=1$
-------------	-------------	-------------	-----------	-----------	------------	---------	---------

Tabela D.1.3. Wartości stałych wykorzystywanych w obliczeniu funkcji kryterialnej Q .

Dodatek 3. przedstawia wydruk z programu optymalizującego parametry regulatora. Przedstawiono na nim te, spośród kolejno otrzymywanych wartości funkcji Q' , które są lepsze (mniejsze) od wcześniejszych. Jak widać, zbiór tych wartości nie jest pusty. Zatem istnieje zestaw parametrów, przy którym regulator (2.31) **spełnia** kryteria jakości działania (zostaną one przedstawione niżej).

Na zamieszczonym wydruku widać również, iż wartości funkcji dążą do pewnej granicy. Oznacza to znalezienie lokalnego minimum funkcji Q' . W różnych przebiegach programu znajduwane minima, oraz wartości funkcji im odpowiadające przeważnie się różnią. Decydującym o wyborze pewnego rozwiązania parametrem jest oczywiście wartość funkcji kryterialnej Q' . W tabeli D.1.4 przedstawiono wartości parametrów x (D.1.11) regulatora, wyłonione po czterech przebiegach programu optymalizującego.

²²Użyta maszyna cyfrowa wykonuje około 0.9 miliona działań zmiennoprzecinkowych na sekundę.

²³W większości przypadków rozkład ten da się doprowadzić do końca. W sytuacjach, w których jest to niemożliwe posłużono się metodą rozwijania wyznacznika względem wiersza. Metoda ta prowadzi do ok. $n!$ mnożeń, co powoduje iż czas obliczeń wydłuża się do ok. 0.06 s

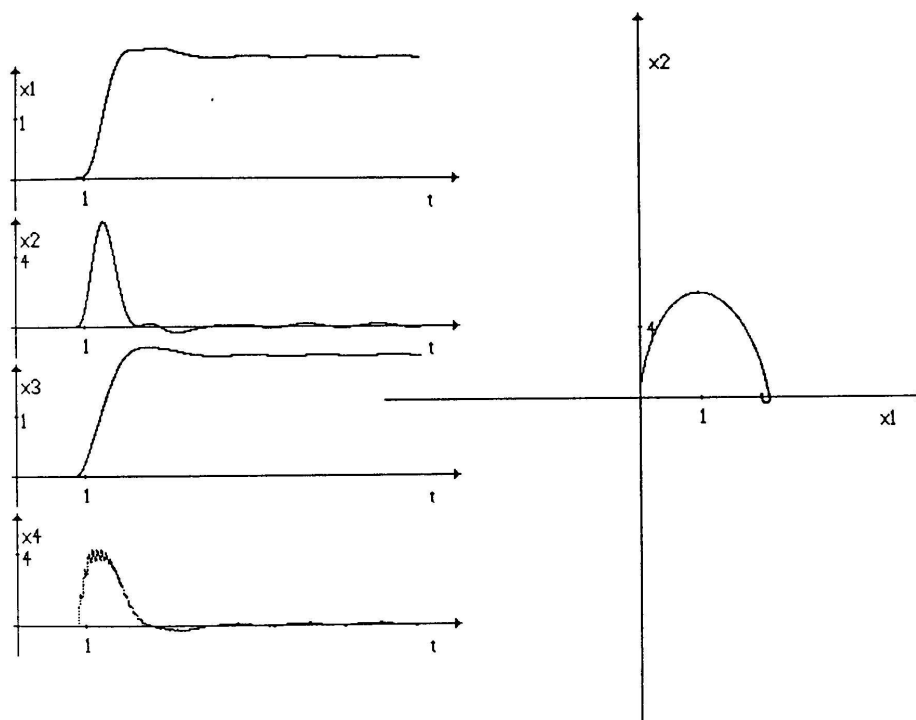
$x_1=U_h=9.85$	$x_2=3.55$	$x_3=99.1$	$x_4=0.927$	$x_5=11.5$	$x_6=1.31$
$x_7=67.1$	$x_8=0.0346$	$x_9=-0.221$	$x_{10}=3.98$	$x_{11}=28$	$x_{12}=-0.274$
$x_{13}=-0.00142$	$x_{14}=7.36$	$x_{15}=14.3$	$x_{16}=-0.594$	$x_{17}=-0.0501$	
$Q'=1.052$					
$Q^*=2.34$					

Tabela D.1.4. Obliczone parametry regulatora nieliniowego.

Wartości parametrów $x_1, x_2, x_3, x_6, x_7, \dots$ wyrażone są w woltach, natomiast parametry $x_4, x_5, x_8, x_9, \dots$ wyrażone są w sekundach kątowych.

W tabeli umieszczono również wartość funkcji kryterialnej $Q'(\mathbf{x})$ rozpatrywanego regulatora nieliniowego, oraz wartość funkcji kryterialnej $Q^*(\mathbf{x})$ odpowiadającej regulatorowi proporcjonalnemu, dla wartości $k_r=0.12$, przy której regulator ten jest najbliższy spełnienia kryteriów jakości. Z porównania wartości $Q'(\mathbf{x})$ oraz $Q^*(\mathbf{x})$ wynika, iż nawet gdyby regulator proporcjonalny spełniał wszystkie kryteria jakości pracy, byłby on zdecydowanie gorszy od regulatora nieliniowego. Rysunek 2.9. przedstawia charakterystykę skokową nieliniowego układu regulacji. Jak widać, konsekwencją optymalizacji parametrów regulatora jest duża prędkość ruchu korekcyjnego, warunkująca krótki czas sterowania, przy jednoczesnym, tylko niewielkim przesterowaniu.

Zoptymalizowane wartości parametrów regulatora dotyczą obiektu regulacji o parametrach $T_2, K_2, \zeta, \omega_n$ podanych w dodatku 2. Parametry te wyznaczone są jednak z pewnym błędem identyfikacji. Policzona dla prawdziwych wartości parametrów wartość funkcji kryterialnej Q' może być większa od podanej, bądź układ regulacji może w ogóle nie spełniać kryteriów jakości. Przez obliczenie wartości Q' dla najbardziej niekorzystnego zestawu parametrów obiektu, można ocenić stopień pogorszenia jakości regulacji.



Rysunek D.1.4
Odpowiedzi skokowe układu sterowania z regulatorem nieliniowym.

Zestaw tych parametrów trudno jest jednak bezpośrednio wyznaczyć²⁴. Niech E oznacza obszar zmienności parametrów $T_2, K_2, \zeta, \omega_n$, zdefiniowany następująco:

²⁴Zależność Q' od wartości parametrów $T_2, K_2, \zeta, \omega_n$ nie jest dla niektórych parametrów monotoniczna.

$$E = \{\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4) \in \mathbf{R}^4:$$

$$(\hat{T}_2 - \Delta_{T_2} < p_1 < \hat{T}_2 + \Delta_{T_2}) \wedge (\hat{K}_2 - \Delta_{K_2} < p_2 < \hat{K}_2 + \Delta_{K_2}) \wedge$$

$$(\hat{\zeta} - \Delta_{\zeta} < p_3 < \hat{\zeta} + \Delta_{\zeta}) \wedge (\hat{\omega}_n - \Delta_{\omega_n} < p_4 < \hat{\omega}_n + \Delta_{\omega_n})\}$$

gdzie: $\hat{T}_2, \hat{K}_2, \hat{\zeta}, \hat{\omega}_n$ - wyznaczone w wyniku identyfikacji wartości parametrów obiektu regulacji (dodatek 2);

$\Delta_{T_2}, \Delta_{K_2}, \Delta_{\zeta}, \Delta_{\omega_n}$ - maksymalne błędy wyznaczonych parametrów (dodatek 2).

Wielkość obszaru E zależy od wartości błędów wyznaczenia parametrów obiektu. Do obszaru tego należy najbardziej niekorzystny zestaw parametrów. Odpowiadającą mu wartość funkcji Q' można nietrudno wyznaczyć stosując opisaną w obecnym podrozdziale metodę przeglądu. Wartość ta wynosi: $Q' = 1.43$ (co oznacza również, iż regulator spełnia kryteria jakości). Porównując ją z wartością zawartą w tabeli D.1.4 można stwierdzić, iż błędy identyfikacji parametrów obiektu regulacji nie mogą w sposób zdecydowany pogorszyć jakości regulacji.

.

Wyrażenia określające stałe występujące w Dodatku 1.

$$A_1 = -k_r(2k_r T_0 \omega_n - 1) / (2k_r T_0 \omega_n - (T_0^2 \omega_n^2 + 1));$$

$$A_2 = -k_r \omega_n (4k_r^2 T_0 \omega_n - 2k_r - T_0 \omega_n) / (2k_r T_0 \omega_n - (T_0^2 \omega_n^2 + 1));$$

$$A_3 = k_r T_0^3 \omega_n^2 / (2k_r T_0 \omega_n - (T_0^2 \omega_n^2 + 1));$$

$$A_4 = k_r.$$

$$B_1 = -\exp(-aT_p)(\cos(\omega_0 T_p) + a/\omega_0 \sin(\omega_0 T_p));$$

$$B_2 = -2\exp(-aT_p)\cos(\omega_0 T_p);$$

$$B_3 = \exp(-2aT_p);$$

$$B_4 = 1/\omega_0 \exp(-aT_p)\sin(\omega_0 T_p);$$

$$B_5 = 1/T_2;$$

$$B_6 = -\exp(-T_p/T_2);$$

$$B_7 = A_4;$$

gdzie:

$$a = \zeta \omega_n;$$

$$\omega_0 = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}.$$

$$C_4 = (B_5 A_3 + B_7 + A_1);$$

$$C_3 = (B_1 A_1 + B_2 (B_5 A_3 + B_7) + B_4 A_2 - B_5 A_3 + B_6 (B_7 + A_1) - A_1);$$

$$C_2 = (B_1 A_1 (B_6 - 1) + B_2 (B_6 B_7 - B_5 A_3) + B_3 (B_5 A_3 + B_7) + B_4 A_2 (B_6 - 1) - B_6 A_1);$$

$$C_1 = (-B_1 B_6 A_1 + B_3 (B_6 B_7 - B_5 A_3) - B_4 B_6 A_2);$$

$$M_4 = 1;$$

$$M_3 = (B_2 + B_6 - 1);$$

$$M_2 = (B_2 (B_6 - 1) + B_3 - B_6);$$

$$M_1 = (B_3 (B_6 - 1) - B_2 B_6)'$$

$$M_0 = -B_3 B_6.$$

Dodatek 2.

Identyfikacja parametrów układu mechanicznego teleskopu na Suhorze.

Obiekt regulacji, złożony jest z członu całkującego z inercją o transmitancji:

$$G_i(s) = \frac{K_2}{s(1 + sT_2)}$$

oraz z członu oscylacyjnego o transmitancji:

$$G_o(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}.$$

Parametrami obiektu są zatem: K_2, T_2 oraz ζ, ω_n .

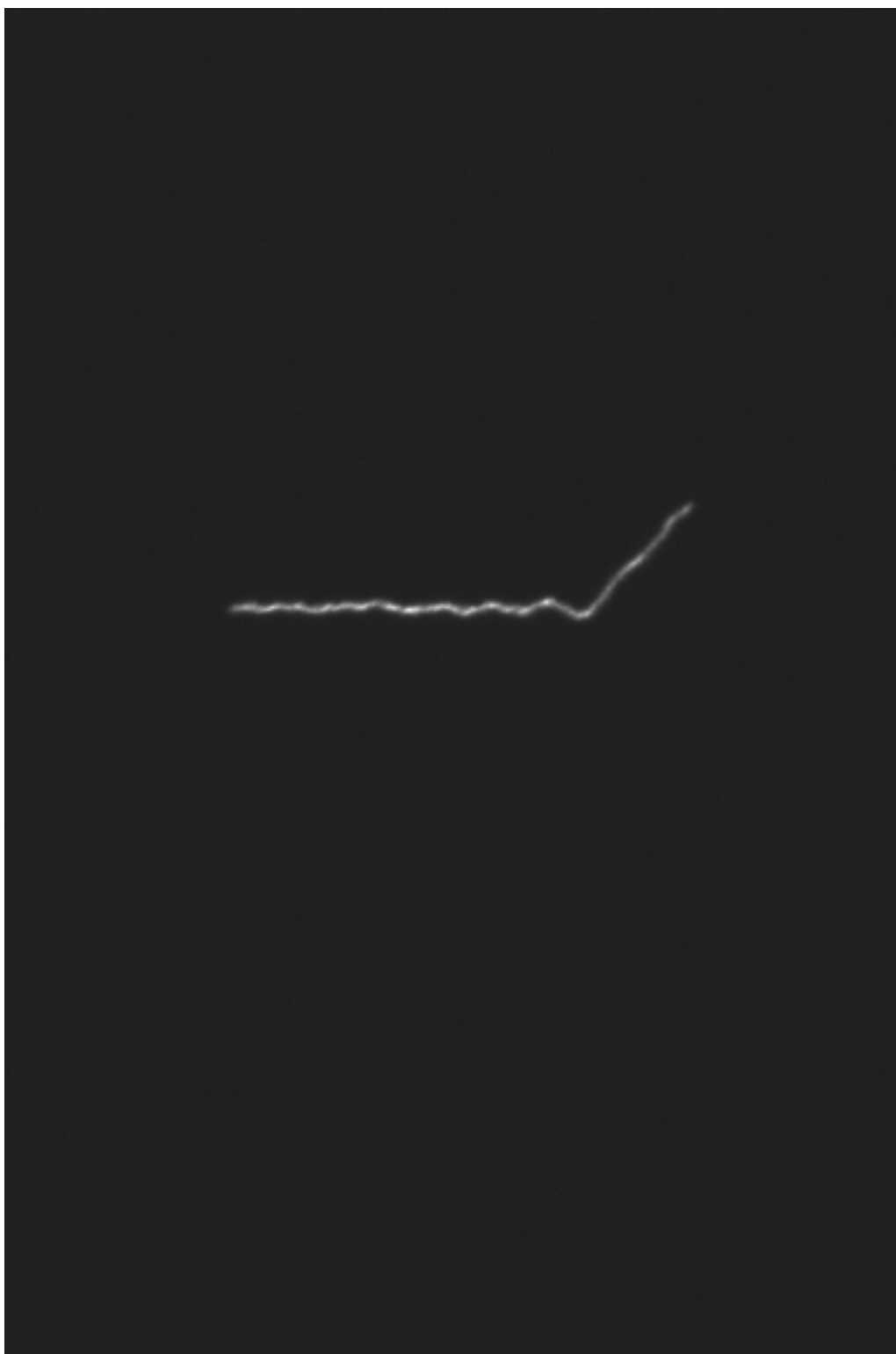
Wszelkie błędy oraz odchyłki w położeniu teleskopu określa się w warunkach obserwatorium w tradycyjnych jednostkach związanych z miarą stopniową kąta, czyli głównie w sekundach łuku. Wyjście obiektu regulacji, jako położenie teleskopu należy zatem określać w sekundach kątowych. Identyfikowane parametry będą więc wyrażane w jednostkach bazujących na sekundzie kątowej.

W celu wyznaczenia powyższych parametrów (z wyjątkiem T_2) przeprowadzono następujący eksperyment:

Z pomocą kamery CCD dokonano w czasie t_e ekspozycji obrazu pewnej jasnej gwiazdy. Ekspozycji dokonano przy włączonym silniku poruszającym teleskop w jednej współrzędnej układu sferycznego, przy czym silnik ten wysterowano napięciem V_s . W czasie trwania ekspozycji włączono silnik poruszający teleskop w drugiej współrzędnej. Rysunek D1 przedstawia zdjęcie otrzymane po przeprowadzeniu opisanego eksperymentu.

1. Wyznaczenie wartości parametru K_2 .

Parametr ten można wyznaczyć mierząc prędkość ruchu kątowego teleskopu (w stanie ustalonym), odpowiadającą napięciu sterującemu V_s , podanemu na wejście układu. Prędkość kątową wyznacza się mierząc długość d śladu gwiazdy pozostawionego przez nią na zdjęciu w tej współrzędnej, w której odbywał się ruch jednostajny (na zdjęciu D.2.1 jest to współrzędna pionowa). Wielkość d (wyrażoną w odległościach między pikselami obrazu (podrozdział 3.2.1) można przeliczyć na przesunięcie kątowe δ teleskopu, korzystając z zależności (3.10):



Rysunek D.2.1

Zdjęcie umożliwiające identyfikację parametrów obiektu regulacji.

$$\delta = d \frac{D}{f}$$

gdzie: f - wypadkowa ogniskowa układu optycznego teleskopu;

D - rozdzielczość przetwornika obrazowego kamery, zdefiniowana jako odległość pomiędzy sąsiednimi pikselami.

Współczynnik K_2 można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$K_2 = \frac{dD}{V_s t_e f}$$

Dla wartości:

$d = 148 \pm 3$ (wartość maksymalnego błędu pomiaru została oszacowana na podstawie zdjęcia D1 (zależy od ostrości zdjęcia));

$D = 3.15 \cdot 10^{-5} \pm 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ (wartość, oraz błąd podaje producent);

$V_s = 4 \pm 0.04 \text{ V}$ (maksymalny błąd pomiaru zależy od użytego woltomierza);

$t_e = 3 \cdot 0.05 \text{ s}$ (błąd zadanego czasu ekspozycji kamery CCD podaje producent);

$f = 7 \pm 0.1 \text{ m}$ (wartość, oraz błąd podaje producent).

dostaje się:

$K_2 = 2.02 \pm 0.13$ sekund kątowych/ V_s (maksymalny błąd został policzony zgodnie z prawem przenoszenia błędów)

2. Wyznaczenie wartości parametru T_2 .

W przyjętym modelu układu mechanicznego teleskopu, silnik elektryczny zamodelowano układem całkującym z inercją. Zgodnie z tym modelem, po wystawieniu układu sygnałem skokowym, prąd w uzwojeniu silnika zmienia się jak funkcja:

$$i(t) = I_{\max} e^{-t/T_2}$$

Obserwując powyższy przebieg na oscyloskopie, łatwo jest ustalić czas, w którym wartość prądu osiągnie 36.7 % (e^{-1}) swojej wartości maksymalnej. Czas ten jest równy T_2 .

W wyniku pomiaru uzyskano: $T_2 = 0.15 \pm 0.025 \text{ s}$ (błąd jest zależny od dokładności pomiaru oscyloskopowego)

3. Wyznaczenie wartości parametrów ζ i ω_n .

Zdjęcie zamieszczone na rysunku D1 można traktować jako przybliżoną ilustrację odpowiedzi skokowej obiektu regulacji. Po czasie $3T_2$ od chwili wyłączenia jednego z silników wpływ przebiegów przejściowych układu całkującego z inercją na postać odpowiedzi obiektu regulacji staje się pomijalny ($<5\%$). Można zatem uważać, iż po tym czasie, zdjęcie przedstawia przebiegi przejściowe układu oscylacyjnego. Korzystając z odpowiedniego programu można odczytać współrzędne pikseli odpowiadających kolejnym ekstremom przebiegu oscylacyjnego. Na tej podstawie można oszacować stosunek amplitud a_p sygnału w kolejnych minimach lub maksimach przebiegu, oraz czas t_m pomiędzy minimami lub maksimami.

Parametry ζ i ω_n wyznacza się następnie z zależności:

$$\zeta = -\ln(a_p)/2\pi,$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{t_m \sqrt{1-\zeta^2}}$$

Jak pokazuje rysunek D1, przebieg sygnału jest zakłócony przez przypadkowe ruchy teleskopu. Widać także, iż amplitudy przebiegów mają wartość tylko kilkakrotnie większą od odległości pomiędzy punktami (pikselami) obrazu. Chcąc zatem zwiększyć dokładność wyznaczenia wielkości a_p oraz t_m należy przeanalizować kilka zdjęć przedstawiających oscylacyjny przebieg układu. W wyniku analizy 8 zdjęć otrzymano ostatecznie następujące wartości :

$\zeta = 0.11 \pm 0.015$ (wartość jest średnią z 8 pomiarów, błąd odpowiada maksymalnej zaobserwowanej odchyłce pomiaru od obliczonej wartości średniej),

$\omega_n = 18.3 \pm 1.2 \text{ rad/s}$ (jak wyżej).

Dodatek 3.

Wydruk z programu optymalizującego parametry regulatora położenia teleskopu.

(nieдоступny)

Znaczenie symboli:

n - układ regulacji jest dla wygenerowanego wektora parametrów niestabilny (w sensie kryterium Jury);

r - wygenerowany wektor parametrów nie spełnia warunku określonego w definicji funkcji ψ (2.32) tzn:

$$\exists k = 1, 2, \dots, n : p_0^k \geq p_1^k;$$

o - układ regulacji nie spełnia kryteriów jakości (2.2), (2.3), (2.6);

- - wygenerowany układ regulacji spełnia wymienione w powyższych punktach kryteria, lecz istnieje wygenerowany wcześniej układ o mniejszej wartości funkcji kryterialnej Q' ;

wartość liczbowa - wartość funkcji kryterialnej Q' wygenerowanego układu regulacji, o ile jest ona mniejsza od wszystkich dotychczasowych;

I - przejście do nowej iteracji.

Dodatek 4.

Wydruki wybranych procedur programu sterowania ruchem teleskopu.

rekordy (zgodnie z nazewnictwem języka C - struktury) wykorzystywane w procedurach:

struct object	<i>definicja rekordu opisującego obiekt drugiego etapu</i>
{	
unsigned x,y;	<i>współrzędne środka</i>
long unsigned bright;	<i>jasność</i>
unsigned n,	<i>liczba pikseli</i>
*matrix;	<i>wskaźnik do macierzy zawierającej współrzędne i jasności pikseli składowych obiektu</i>
};	
 struct stage	 <i>rekord reprezentujący obraz jako zbiór obiektów.</i>
{	
unsigned n_object;	<i>liczba obiektów</i>
struct object *obj_ptr;	<i>wskaźnik do macierzy zawierającej obiekty</i>
};	

moduł zawierający funkcje scan_line1 i sma1

MODEL LARGE ;

Stack_size EQU 4100h *definicje stałych*

Max_point_x_2 EQU 4000h; Max_point defined in def.h = 2000h = 8196 points

EXTRN _spill_pic_seg:WORD *zmienne zadeklarowane w module napisanym w języku C*

EXTRN _spill_pic_off:WORD,_spill_limit_off:WORD

EXTRN _spill_matrix_seg:WORD

EXTRN _spill_n_point:WORD,_spill_gray:WORD,_spill_limit_points:WORD

EXTRN _extended_stack_seg:WORD

PUBLIC _scan_line1

początek procedury scan_line1

.CODE

_scan_line1 PROC ; scanning and call sma1

 ; change registers ds, es, di, si, ax, bx, cx, dx, bp, ss, sp

mov cx, ss ; extended stack *zmiana obszaru pamięci stosu,
na obszar odpowiednio powiększony,
przydzielony przez system operacyjny
(przydzielnie większego obszaru pamięci
jest konieczne z powodu wielokrotnej
rekurencji procedury sma1)*

mov bx, sp ;

mov ss, [_extended_stack_seg]; *nowy segment stosu*

mov sp, Stack_size ;

push cx ; *memempering old stack na nowym stosie w pierwszym
rzędzie zapamietywany jest adres
poprzedniego*

push bx ;

push si

push di

push ds

push bp

*inicjacja wartości rejestrów, które traktowane
będą jak zmienne procedury*

mov bx, [_spill_pic_off]

mov bp, [_spill_limit_off]

mov ax, [_spill_limit_points]

mov cx, [_spill_gray] ; cl: limit gray, ch: pushed value to funding point

mov es, [_spill_matrix_seg]

mov ds, [_spill_pic_seg]

xor di,di ; 2 * number of points in object

```

mov si,di      ; global bright
mov dx, di     ; bright
sal ax,1       ; limit points

cld            ; for statement stosw

cykle begin
  cmp bx, bp;      ; in bp limit value of offset      ograniczenie końca linii
  ja toend
  cmp [byte ptr bx], cl      ; starting point ?      sprawdzenie jasności piksela

  jae midle        ; .
                    petla szukająca w jednej linii obrazu piksela o wartości większej od
                    zadanej (w tej wersji procedury scan_line poziom tła jest stały)

begin:
  inc bx
  inc bx          w bx zapisane są dwie 8-bitowe współrzędne obrazu

  cmp bx, bp;      ; in bp limit value of offsetoffset  ograniczenie końca linii
  ja toend
  cmp [byte ptr bx], cl      ; starting point ?      sprawdzenie jasności piksela

  jb begin        ; ^      jeżeli za mała jasność, to szukaj dalej
midle:            blok zawierający wywołanie funkcji sma
  push bx
  push ax
  call sma1      ; sma return in di number of point, in dx,si bright
  pop ax
  pop bx
  cmp di, ax      jeżeli obiekt posiada odpowiednią ilość pikseli,
                  to koniec bieżących poszukiwań

  jae toend      ; if number of point >= spill_limit_point : exit
  xor dx,dx      ; dx=0
  mov di,dx      ; di=0

```

jmp begin ; ^

toend:

*przygotowanie do powrotu do programu
wywołującego (scan_object)*

mov ax, dx ; to output value

*przekazanie poprzez rejestry wartości
wyjściowej funkcji - tj. jasności znalezionego
obiektu*

mov dx, si ;

pop bp

pop ds

shr di,1

mov [_spill_n_point], di

mov [_spill_pic_off], bx

pop di

pop si

pop bx ; restore old stack

odtworzenie oryginalnego stosu

pop cx ;

mov sp, bx ;

mov ss, cx ;

retf

_scan_line1 ENDP

procedura sma1

sma1 PROC NEAR

cmp di, Max_point_x_2 ;

di - licznik pikseli;

ograniczenie ilości punktów w obiekcie

jae endsma

add dl, [bx] ; bright

w dx,si jasność obiektu

adc dh,0 ;

adc si,0 ;

dwie poniższe instrukcje służą do
zapamiętania położenia piksela

*sprawdzanie kolejnych pikseli
sąsiednich*

pa1:dec bl

pa2:dec bh

pa3:inc bl

```
cmp [byte ptr bx], cl    ; is this point ok. ?
```

jb pa4

call sma1 ; ^^^^^^^^^^^^^^^^^^

rekurencyjne wywołanie

pa4:inc bh

endsma1:

retn

sma ENDP

.STACK 100h ;

END

moduł zawierający funkcje scan_line i sma

.MODEL LARGE ;

definicje stałych

Max_point_4 EQU 6000h; Spill_max_points defined in def.h = 1800h points
;=24576 = 4*6144

*zmienne zadeklarowane w module
napisanym w języku C*

EXTRN _spill_pic_seg:WORD

EXTRN _spill_pic_off:WORD,_spill_limit_off:WORD,_spill_push:WORD

EXTRN _spill_n_point:WORD,_spill_limit_points:WORD ;
spill_limit_points=bottom limit

EXTRN _spill_matrix_seg:WORD ; (min alloc size + 4*Max_point)

EXTRN _spill_stack_seg:WORD ; (alloc size = 4*2*Max_point= c000h)

EXTRN _spill_bottom_seg:WORD ; (min alloc size = 10000h / 4 = 4000h)

PUBLIC _scan_line

procedura scan_line

.CODE

.386

_scan_line PROC ; scanning and call sma

; change registers ds, es, di, si, ax, bx, cx, dx, bp

push si

push di

push ds

push bp

*inicjacja wartości rejestrów, które traktowane
będą jak zmienne procedury*

```

; ddddddddddddddddddd data ddddddddddd
mov bx, [_spill_pic_off]
mov bp, [_spill_limit_off]
mov ax, [_spill_limit_points]
mov cx, [_spill_push] ; ch: pushed value to funding point
; cl: limit gray, not use =0
mov es, [_spill_matrix_seg]
mov fs, [_spill_stack_seg]
mov gs, [_spill_bottom_seg]
mov ds, [_spill_pic_seg] ; must be last
; ddddddddddddddddddd data ddddddddddd

```

```

xor di,di ; reset number of point in object

```

```

cld ; for statement stosw
shl ax,2 ; 4*limit points

```

petla wyszukujaca odpowiednio jasne piksele

begin:

```

mov di,bx
shr di,2; ; bottom offset= picture offset / 4
mov cl, [byte ptr gs:di] ; bottom gray map gs:di
; check 4 of 8 pixels in one line

```

*nie wiadomo, czy znaleziony piksel nie jest pojedynczy, dlatego bardziej oplaca się szybko sprawdzić sąsiadów w tym miejscu, niż powierzyć to procedurze **sma**; jeżeli znajdzie się choć jeden "dobry" sąsiad, to wywołuje się **sma***

```

cmp [byte ptr bx], cl ; starting point ?
jae callsma0
c0: cmp [byte ptr bx+2], cl ; starting point ?
jae callsma1
c1: mov cl, [byte ptr gs:di+1]; bottom
cmp [byte ptr bx+4], cl ; starting point ?
jae callsma2
c2: cmp [byte ptr bx+6], cl ; starting point ?

```

```

    jae callsma3
c3:
    add bx,8
    cmp bx, bp;           ; in bp limit value of offset
    jnb begin; ^^^^^^      koniec pętli szukającej piksele obiektu

```

```

    mov di,0
    jmp toend

```

*wywołania **sma** dla odpowiednio jasnych sąsiadów*

```

callsma0:
    push bx
    push ax
    call sma      ; sma return in di 4*number of point, in edx bright
    pop ax
    pop bx
    cmp di, ax
    jb c0      ; if number of point < spill_limit_point

    jmp toend ; else exit

```

```

callsma1:
    push bx
    push ax
    add bx,2
    call sma      ; sma return in di number of point, in edx bright
    pop ax
    pop bx
    cmp di, ax
    jb c1      ; if number of point < spill_limit_point
    add bx,2
    jmp toend ; else exit

```

callsma2:

push bx

push ax

add bx,4

call sma ; sma return in di number of point, in edx bright

pop ax

pop bx

cmp di, ax

jb c2 ; if number of point < spill_limit_point

add bx,4

jmp toend ; else exit

callsma3:

push bx

push ax

add bx,6

call sma ; sma return in di number of point, in edx bright

pop ax

pop bx

cmp di, ax

jb c3 ; if number of point < spill_limit_point

add bx,6

;; jmp toend ; else exit

toend:

okreslenie wartości wyjściowej procerury (jasność obiektu)

mov ax, dx ; to output value

shr edx, 16

pop bp

pop ds

shr di,2

```
mov [_spill_n_point], di
mov [_spill_pic_off], bx
pop di
pop si
```

```
retf
_scan_line ENDP
```

procedura sma

```
sma PROC NEAR
```

```
xor eax,eax    ; eax=0
xor edx,edx    ; edx=0
mov di,ax      ; di=0
mov si,ax      ; si=0
```

obszar pamięci fs:si jest wykorzystywany jak stos, na którym zapamiętuje się pozycje pikseli

```
mov [fs:si], bx ; first pixel to stack
```

```
start:    ; get pixel
```

```
  cmp si,0
```

```
  jl endsma
```

```
  mov bx, [fs:si] ; pixel from stack fs:si      pobranie piksela ze stosu
```

```
  sub si,2
```

```
  mov al, [byte ptr bx]
```

```
  cmp al,ch
```

```
je start
```

jeśli jest to miejsce, które już procedura "odwiedziła", to skok do góry i pobranie następnego piksela

```
sub al,cl
```

obliczenie i zapamiętanie jasności i pozycji piksela (w poprzedniej wersji jasność pojedynczych pikseli nie była zapamiętywana)

```
add edx,eax    ; bright
```

```
mov [bx], ch   ; sigh
```

```
xor eax,eax    ; eax=0
```

```
jb start
```

```
endsma:
    retn
sma ENDP
.286
.STACK 100h ;
END
```

procedura skanująca obiekty w określonym wycinku obrazu

```
int scan_object( struct object *o, unsigned *no,
                unsigned x1, unsigned y1, unsigned x2, unsigned y2 )
argumenty: wskaźnik do macierzy zawierającej obiekty, ilość obiektów (wskaźnik),
           współrzędne prostokąta definiującego skanowany wycinek obrazu
/* scan picture and set all objects parametrs
```

```
global variabs:          parametry wywołania procedury scan_line
    spill_pic_seg, spill_pic_off, spill_limit_off,
    spill_n_point, spill_gray(not use), spill_limit_points,
    spill_matrix_seg, spill_stack_seg, spill_bottom_seg;
```

```
return: 0 - no error detected
        1 - matrix over
        2 - too many points ( stack over )
        3 - too many objects      */
```

```
{
unsigned beg_line, end_line, matrix_seg_old;
long unsigned bright;
*no= 0;
matrix_seg_old= spill_matrix_seg;  /* area used by scan_line function */
end_line= y2*Sx;
```

numer końcowego piksela wycinka obrazu, na którym zakończy się poszukiwane (obraz zapisany w pamięci linia po linii, traktowany jest tutaj jak jednowymiarowa macierz, macierz ta

zapisana jest w ten sposób, że pierwszy piksel ma adres:
spill_pic_seg : 0)

petla poszukująca obiekty w liniach wycinka obrazu

```
for( beg_line= y1*Sx; beg_line <= end_line; beg_line+=Sx+Sx )  
{
```

*pierwszym pikselem przeszukiwanej linii
obrazu jest piksel o numerze spill_pic_off*

```
spill_pic_off= beg_line + x1;  
spill_limit_off= beg_line + x2;
```

petla poszukująca obiekty w jednej linii

```
while( spill_pic_off <= spill_limit_off )  
{  
  bright= scan_line(); /* !!!!!!! call scan_line !!!!!!! */ wywołanie scan_line  
  if( spill_n_point >= Spill_max_points )  
    { spill_matrix_seg= matrix_seg_old; return( 2 ); }  
    /* too many points in object, area was limited */  
  
  if( *no > Max_object-1 ) /* too many objects */  
    { spill_matrix_seg= matrix_seg_old; return( 3 ); }
```

*zapamiętanie parametrów znalezionej obiekty w rekordzie
wskazywanym przez "o"*

```
if( spill_n_point > 0 && bright > 0 ) /* else good: */  
{  
  o->n = spill_n_point;  
  o->bright = bright;  
  o->matrix = MK_FP( spill_matrix_seg, 0 );  
    /* new segment for next matrix */  
  spill_matrix_seg += spill_n_point / 4 + 1;
```

/ check possible overrun limit matrix size */*

```
if( (( spill_matrix_seg - matrix_seg_old ) < 4 ) + (long)4*Spill_max_points >
```

```

        Spill_matrix_size )
    { spill_matrix_seg= matrix_seg_old; return( 1 ); }

    obliczenie współrzędnych środka znalezionej obiekty
    center( o ); /* compute object center ( <8 high accuracy ) */
    ++(*no);
    ++o;
    }
} /* end while */
} /* end for */

/* old spill_matrix_seg for next call scan_object */
spill_matrix_seg= matrix_seg_old;
return( 0 );
} /* end scan_object */

```

moduł zawierający procedurę **center** (obliczenie współrzędnych środka obiekty)

```

.MODEL LARGE ;
PUBLIC _center
.CODE
_center PROC ;
    ; change registers ds, di, bp ,ax, bx, cx, es
    push ds
    push di
    push si
    push bp
.386
    mov bp, sp      argumentem procedury jest wskaźnik do rekordu typu object,
                    argument ten jest pobierany ze stosu i ładowany do
                    odpowiednich rejestrów

    mov di, [bp+12] ; struct offset
    mov es, [bp+14] ; struct segment

```

```

                                odczytanie ilości pikseli obiektu, oraz wskaźnika do macierzy
                                pamiętającej współrzędne i jasność pikseli
mov si, [es:di+8] ; n
mov bx, [es:di+10] ; matrix offset
mov ds, [es:di+12] ; matrix segment


cmp si,0
je toend


push di;   di is used in loop



xor eax,eax ;    eax= 0
xor edi,edi ;    ,,,,
xor edx,edx ;    ,,,,


shl si,2      ;    si= 4*n




obliczenie sumy iloczynów jasności i współrzędnych piksela
begin:       ; -----
xor eax,eax
mov cl, [byte ptr bx+2] ; pixel gray


mov al, [byte ptr bx]     ; its x - coordination
mul cl                   w ax iloczyn jasności i współrzędnej x piksela
add edx,eax              w edx suma


mov al, [byte ptr bx+1]   ; y - coordination
mul cl                   w ax iloczyn jasności i współrzędnej y piksela
add edi,eax              w edi suma


add bx,4
cmp bx,si
jbe begin ; ~~~~~~
```

```
mov ebx,edi
xor edi,edi
pop di
```

mnożenia sum przez 256 i dzielenie przez jasność obiektu

```
mov eax,edx      ; x coordination
shr edx,24
shl eax, 8       ; edx: 0000 00xx    eax: xxxx xx00
mov ecx,[es:di+4]    w tym polu rekordu jest jasność obiektu
div ecx
mov [es:di], ax
```

```
mov eax,ebx      ; y coordination
mov edx,eax
shr edx,24
shl eax, 8       ; edx: 0000 00xx    eax: xxxx xx00
mov ecx,[es:di+4]    w tym polu rekordu jest jasność obiektu
div ecx
mov [es:di+2], ax
```

.286

toend:

```
pop bp
pop si
pop di
pop ds
ret
```

_center ENDP

END□

procedury set_i_driver, i_driver

```
void set_i_driver( int xx1, int xx2 )
```

```
{  
    zmienne i_x1, i_x2 są licznikami mierzącymi długość  
    impulsu sterującego silnikiem
```

```
i_semaphore=0;
```

```
i_x1= xx1; i_x2= xx2;
```

```
i_semaphore=1;
```

```
}
```

```
void i_driver() /* normal call ! */
```

```
{
```

procedura ta nie ma przedrostka "interrupt" gdyż nie jest bezpośrednio wywoływana przerwaniem zegarowym (wywoływana jest przez pewną funkcję, która aktywowana sprzętowym przerwaniem zegarowym, wywołuje co odpowiednią ilość cykli (częstotliwość przerwania została zwiększona) standardowe procedury obsługi przerwania zegarowego, umożliwiając przez to poprawną pracę funkcji systemu operacyjnego, które wykorzystują pomiar czasu)

```
int v1,v2;
```

```
if( i_semaphore==0 ) return;
```

```
    v1= 0; v2= 0;
```

```
    if( i_x1>0 ) { --i_x1; v1=-system_par->speed; }
```

```
    if( i_x1<0 ) { ++i_x1; v1= system_par->speed; }
```

```
    if( i_x2>0 ) { --i_x2; v2=-system_par->speed; }
```

```
    if( i_x2<0 ) { ++i_x2; v2= system_par->speed; }
```

```
    set_voltage( v2, v1 ); /* v2,v1 : change */
```

```
}
```

Literatura.

1. V.Cappellini, editor: Time-Varying Image Procesing and Moving Object Recognition, 2, Proceedings of the 3rd International Workshop, Florence 1989.
2. Tzay Y.Young, editor: Handbook of Pattern Recognition and Image Processing, Academic Press, Orlando 1986.
3. T.Pavlidis: Grafika i przetwarzanie obrazów, WNT, Warszawa 1987.
4. R.Tadeusiewicz,M.Flaśiński: Rozpoznawanie obrazów, PWN, Warszawa 1991.
5. J.C.Bezdek: Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, New York 1981.
6. M.P.Ekstrom: Digital Image Processing Techniques, Academic Press, Orlando 1987.
7. R.Engelking: Zarys topologii ogólnej, PWN, Warszawa 1965.
8. R.Kibrick, L.Robinson: Publications of the Astronomical Society of the Pacific 1987, 99, s619.
9. L.Robinson, editor: Instrumentation for Ground-Based Optical Astronomy Present and Future, Springer Verlag, New York 1988.
- 10.T.Kaczorek: Teoria układów regulacji automatycznej, WNT, Warszawa 1986.
- 11.R.E.Nather, D.E.Winget, J.C.Clemens, J.C.Hansen, B.P.Hine: Astrophys., 361, 309, 1990.
- 12.J.Krzesiński, K.Wójcik: Multi-task guiding system of the Mt. Suhora Observatory, Astronomy and Astrophysics, Springer-Verlag Heidelberg 1993, 12.
- 13.A.Niederliński: Systemy komputerowe automatyki przemysłowej, t.2, Zastosowania, WNT, Warszawa 1985.
- 14.W.Pełczewski: Teoria sterowania, WNT, Warszawa, 1980.
- 15.W.Sobczak, W.Malina: Metody selekcji i redukcji informacji, WNT, Warszawa, 1985.
- 16.W.Hejmo, R.Kozioł: Systemy mikroprocesorowe w automatyce napędu elektrycznego, WNT, Warszawa, 1989.
- 17.A.Niederliński: Systemy i sterowanie, Wstęp do automatyki i cybernetyki technicznej, PWN, Warszawa, 1983.
- 18.J.Kucharczyk: Algorytmy analizy skupień w języku ALGOL 60, PWN, Warszawa, 1982.
- 19.J.Ihnatowicz: Laboratorium wybranych zagadnień cyfrowego przetwarzania obrazów, Skrypty uczelniane, Politechnika Śląska, Gliwice, 1986.

- 20.M.A.Ajzerman, E.M.Brawerman, L.I.Rozonoer: Rozpoznawanie obrazów, Metoda funkcji potencjalnych, WNT, Warszawa, 1976.
- 21.W.Malina: Podstawy automatycznej klasyfikacji obrazów, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 1990.
- 22.J.M.Kreiner: Astronomia z astrofizyką, PWN, Warszawa, 1988.
- 23.J.L.Horner, editor: Optical signal processing, Academic Press, London, 1987.
- 24.M.Ollus, editor: Digital image processing in industrial applications, Proceedings of the First IFAC Workshop Espoo, Finland, 1986.
- 25.B.Kirighan, D.Richie: Język C, WNT, Warszawa 1985.
- 26.J.Bielecki: Encyklopedia Języka C, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1989.
- 27.K.Wójcik: Zastosowanie algorytmów przetwarzania obrazów w systemie sterowania ruchem teleskopu astronomicznego, Elektrotechnika, Wydawnictwa AGH tom 12 zeszyt 3, 1993.
- 28.S.Kruk: Programowanie w języku assembler, PLJ Warszawa 1992.
- 29.Z.Fortuna, B.Macukow, J.Wąsowski: Metody numeryczne, WNT Warszawa 1982.
- 30.L.BuLhak, R.Goszyński, M Tuszyński: DOS 5.00 od środka, HELP, Warszawa 1992.
- 31.M.Kotowski: Wejście, wyjście i okolice asembler 8086/8088, LUPUS, Warszawa 1991.
- 32.....Mikroprocesory 80286, 80386 i I486, HELP.....
- 33.H.Górecki: Analiza i synteza układów regulacji z opóźnieniem, WNT Warszawa 1971.
- 35.J.i M.Jankowscy: Przegląd metod i algorytmów numerycznych, WNT Warszawa 1981.
36. W.Findeisen: Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji, PWN Warszawa 1979.
37. Poradnik Inżyniera Matematyka WNT Warszawa 1987.
38. A.F.J.Moffat: A theoretical investigation of focal stellar images in the photographic emulsion and application to photographic photometry, Astronomy and Astrophysics, Springer-Verlag Heidelberg 3,1969.
- 39.P.Stetson: The techniques of least squares stellar photometry with CCDs, V Escola Avancada de Astrofisica 1989 Aguas de Sao Pedro, Brazil.
- 40.E.Rybka: Astronomia ogólna, PWN Warszawa 1978.
- 41.N.Wirth: Algorytmy + Struktury danych = Programy, WNT Warszawa 1983.

