

Piotr SKRZYPCZYŃSKI, Antoni WOŹNIAK

Politechnika Poznańska, Katedra Automatyki, Robotyki i Informatyki

GEOMETRYCZNY MODEL OTOCZENIA DLA CELÓW NAWIGACJI ROBOTA MOBILNEGO

Streszczenie: W niniejszej pracy zaprezentowano metody tworzenia map geometrycznych dla autonomicznego robota mobilnego na podstawie danych multisensorycznych. Przedstawiono metody wstępnego przetwarzania danych, sposoby fuzji danych multisensorycznych obejmujących dane z dalmierza IR oraz podsystemu sensorów ultradźwiękowych i metody wykrywania linii będących podstawowymi obiektami w budowanym modelu otoczenia. Zaprezentowano algorytmy i wyniki badań symulacyjnych.

GEOMETRICAL MODEL OF AN ENVIRONMENT FOR MOBILE ROBOT NAVIGATION

Summary: Methods of geometrical cartography are presented. Methods of primary data interpretation, multisensor data fusion and line matching are included. The algorithms and results of simulations are presented.

GEOMETRISCHES WELTMODELL FÜR DIE NAVIGATION DES MOBILEN ROBOTERS

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit stellt die geometrische Modellierung der Welt für die Navigation eines autonomen mobilen Roboters auf Grund der Multisensordaten dar. Die Methoden der Sensordaten vorverarbeitung, Fusion von Multisensordaten und die Methoden der Linienmatching werden vorgestellt. Die Algorithmen und Ergebnisse der Simulationen werden präsentiert.

1. Wstęp

Autonomiczny robot mobilny jest maszyną wykonującą swoje zadania bez zewnętrznego wsparcia ze strony operatora. Podstawową własnością takiego robota jest możliwość samodzielnego poruszania się w nieznanym (lub tylko częściowo znanym) dynamicznym otoczeniu. Wykonanie tego zadania wymaga posiadania przez robota modelu świata, który

odzwierciedlałby aktualną pozycję robota względem otoczenia. Stworzenie takiego modelu świata wymaga wyposażenia robota w odpowiednie układy sensoryczne. Optymalnym rozwiązaniem jest fuzja danych z różnych sensorów. Jest to realizacja idei systemu multisensorycznego, w którym sensory oparte o różne fizyczne zasady pomiaru uzupełniają się [3].

Podstawowym problemem przy tworzeniu modelu świata dla robota mobilnego jest sposób reprezentacji otoczenia w tym modelu. W mapie geometrycznej każdy wykryty przez sensory obiekt — linia, punkt, zamknięty obszar posiada geometryczne odwzorowanie w mapie otoczenia. Takie podejście do zbierania informacji o środowisku robota ma pewne zalety:

- Oszczędność zasobów systemu przetwarzającego (pamięci, przestrzeni dyskowej itp.) — geometryczna reprezentacja obiektu wymaga przechowywania mniejszej ilości informacji.
- Łatwość aktualizowania mapy w wypadku stwierdzenia nieprawidłowości (np. błędów pozycjonowania robota).
- Możliwość wykorzystania stworzonej geometrycznej reprezentacji obiektów na wyższym poziomie abstrakcji układu sterowania robotem (np. planowanie zadań) [4].

Powyższe rozważania legły u podstaw przyjętego w niniejszej pracy rozwiązania modelowania otoczenia dla autonomicznego robota mobilnego. Jest to system kartografii geometrycznej oparty o dane uzyskiwane z dalmierza IR (podczerwieni) oraz systemu sensorów ultradźwiękowych.

2. Założenia

Podstawowym zadaniem kartografii geometrycznej jest generowanie geometrycznego modelu świata otaczającego robota mobilnego i zarządzanie nim. Jej najistotniejszą cechą jest rozpoznawanie obiektów w postaci figur geometrycznych: i zapamiętywanie ich położenia względem układu współrzędnych środowiska pracy robota. W oparciu o tak wygenerowany model otoczenia realizowane są pozostałe funkcje układu sterowania robota.

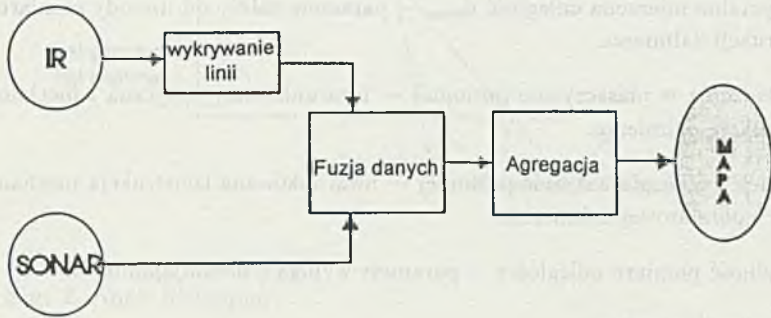
Najważniejszymi problemami do rozwiązania są:

- Wykrywanie obiektów geometrycznych.
- Fuzja danych multisensorycznych w spójny model lokalny otoczenia.
- Korygowanie błędów pozycji powstałych wskutek niedokładności sensorów.
- Archiwizacja zebranych informacji w odpowiedniej strukturze danych.

Proponowany system składa się z modułów:

- Przetwarzania wstępnego danych z sensora IR.

- Fuzji danych z sensorów.
- Archiwizacji danych.



Rys. 1. Blokowy schemat systemu kartografii geometrycznej
 Fig. 1. Block chart of geometrical cartography system

Przedstawiony system kartografii geometrycznej wykorzystuje dane otrzymane przez skanowanie otoczenia w płaszczyźnie poziomej, równoległej do podłoża. Przetwarzanie odbywa się w dwuwymiarowym, płaskim układzie współrzędnych. Ogranicza to wprawdzie możliwość wykorzystania robota wyposażonego w taki system w dowolnym środowisku, pozwala jednak w zamian na znaczne zmniejszenia ilości przetwarzanej informacji. W związku z powyższym ograniczeniem, przyjętą metodą reprezentacji otoczenia (linie, klustery) oraz własnościami dalmierza IR (niewielki zasięg skanowania) prezentowany system predestynowany jest do wykorzystania w środowisku pomieszczeń zamkniętych.

3. Wstępne przetwarzanie danych

3.1. Główne zadania systemu przetwarzania wstępnego

Podstawowym zadaniem systemu przetwarzania wstępnego jest ekstrakcja syntetycznych danych o badanym środowisku na podstawie danych sensorycznych. Służy do tego interpretacja statystyczna pierwotnych danych. Działania te są podejmowane w celu ograniczenia ilości przechowywanych i przetwarzanych danych oraz uzyskania ich w postaci dogodnej do dalszego wykorzystania. Dane są przetwarzane do postaci histogramów — kątownego i odległościowego (X-Y), które służą następnie określeniu lokalnych układów współrzędnych oraz korygowaniu błędów pozycjonowania.

3.2. Charakterystyka pomiarów dalmierzem podczerwieni

Robota wyposażono w dalmierz oparty o diodę luminescencyjną pracującą w paśmie podczerwieni. Dalmierz można scharakteryzować za pomocą następujących parametrów:

- Minimalna mierzona odległość d_{min} — parametr wynika z przyjętej metody pomiaru.
- Maksymalna mierzona odległość d_{max} — parametr zależy od metody pomiaru oraz konstrukcji dalmierza.
- Kąt widzenia w płaszczyźnie poziomej — uwarunkowany optyczną i mechaniczną konstrukcją dalmierza.
- Rozdzielczość w płaszczyźnie poziomej — uwarunkowana konstrukcją mechaniczną głowicy pomiarowej dalmierza.
- Dokładność pomiaru odległości — parametr wynika z metody pomiaru.
- Częstotliwość pomiaru.

Dalmierz IR zamontowany jest na robocie w obrotowej głowicy. Ma ona możliwość zmiany wysokości skanowania, dzięki systemowi lusterek odchylających. Nie jest to jednak w opisanym tu systemie kartografii geometrycznej wykorzystywane.

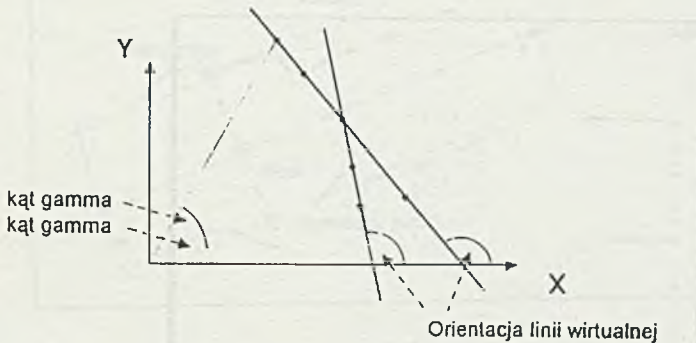
3.3. Zasady budowy histogramów dla pomiarów dalmierzem podczerwieni

Histogramy otoczenia robota są generowane w procesie dwustopniowym. W kroku pierwszym tworzony jest histogram kątowy — znajduje się główne kierunki w skanowanym środowisku (kierunki, wzdłuż których leżą najdłuższe wykryte fragmenty otoczenia). W kroku drugim tworzony jest histogram X-Y opisujący położenie poszczególnych wykrytych linii [2], [4].

W celu wygenerowania histogramu kąтового są rozpatrywane dwa punkty (uchwycone w czasie skanowania otoczenia), między którymi zawarty jest pewien kąt obrotu skanera γ i na ich podstawie wyznaczana jest orientacja wirtualnej linii poprowadzonej między tymi punktami (rys. 2).

Dokonuje się analizy częstotliwości występowania poszczególnych orientacji określanych jako kolejne kąty α_i , w celu wykrycia lokalnych maksimum (najczęściej występujących orientacji), leżących na równoległych prostych. Takie postępowanie wynika z przyjętych założeń o środowisku robota — porusza się on w pomieszczeniach, budynkach, gdzie dominują równoległe i prostopadłe układy ścian, korytarzy itp. Najwyższy punkt histogramu przyjmuje się jako główny kierunek otoczenia α_{max} .

Stosując progowanie wykrytych maksimum ustala się główne kierunki w otoczeniu. Można wówczas ustalić oś X lokalnego układu współrzędnych w taki sposób, by była równoległa do głównego kierunku wykrytego w otoczeniu. Następnie tworzony jest histogram X-Y (położeń) oparty na poprawionym - zorientowanym według środowiska -



Rys. 2. Histogram kątowy

Fig. 2. Angle histogram

układzie współrzędnych. Tworzony jest histogram częstotliwości wykrywania przeszkód względem odległości pomiaru w kierunkach X i Y. Wykrywane są maksima w obu kierunkach, które określają położenie najważniejszych elementów środowiska, np. ścian, drzwi (rys. 3). Dokonywane jest progowanie maksimów — pozostawia się po trzy punkty z każdej strony robota (z lewej, prawej; z przodu i z tyłu). Tworzą one wraz z głównym kierunkiem otoczenia α statystyczną reprezentację lokalnego otoczenia robota.

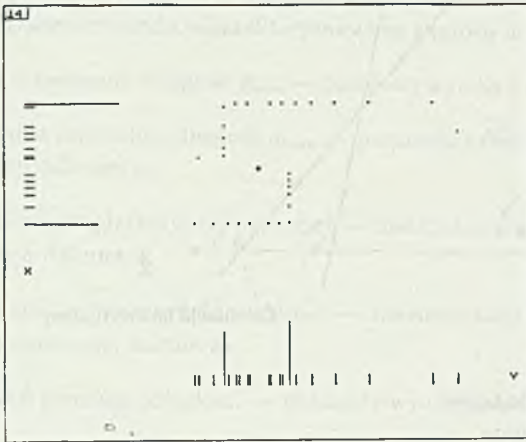
3.4. Generacja ramek

Ramki zostały zdefiniowane jako prostokątne obszary w płaszczyźnie X-Y wokół aktualnej pozycji robota i reprezentują one podstawową strukturę środowiska. Orientacja ramki jest określona przez kąt α histogramu kąтового. Określenie granic ramki w poszczególnych kierunkach następuje na zasadzie wyboru największej ramki [4]. W metodzie tej jako graniczne wybierane są punkty najbardziej odległe od pozycji robota po każdej jego stronie (rys. 4). Jeżeli w danym kierunku nie wykryto żadnych przeszkód, ramka otrzymuje ograniczenie na granicy zasięgu dalmierza, opatrzone atrybutem 'pseudo'. Dla większości środowisk zgodnych z uprzednio przyjętymi założeniami metoda ta najlepiej reprezentuje strukturę otoczenia [4].

4. Fuzja danych multisensorycznych

Dane uzyskane z sensorów ultradźwiękowych są weryfikowane przez porównanie z danymi z dalmierza IR. Metodę porównania oparto o następujące założenia [3]:

- Eliminacja sprzeczności: gdy odległość do przeszkody otrzymana z sensorów ultradźwiękowych jest większa niż otrzymana z dalmierza IR, dane z ultradźwięków



Rys. 3. Histogram odległościowy w osi X (symulacja)

Fig. 3. Distance histogram in X axis (simulation)

są ignorowane.

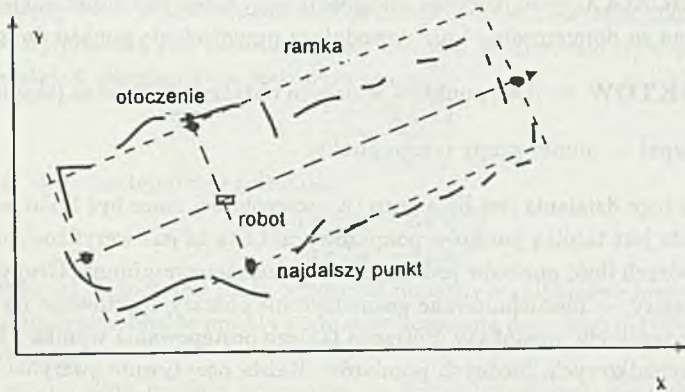
- Minimalizacja nadmiaru informacji : jeżeli pomiary z obu typów sensorów są zgodne, ze względu na większą dokładność przyjmowany jest pomiar z dalmierza IR.
- Maksymalizacja dopełniania się danych : jeżeli sensory ultradźwiękowe wykryły przeszkodę w mniejszej odległości niż dalmierz, oznacza to, że jest to przeszkoda niewykrywalna dla tego typu sensora. Wówczas dane z sensora IR zastępowane są pomiarem ultradźwiękowym.

5. Konstrukcja mapy geometrycznej

5.1. Wykrywanie linii i obiektów

Kompozycja mapy geometrycznej polega na zintegrowaniu aktualnych danych sensorycznych w jeden obraz otoczenia. W tym celu należy wykryć na podstawie danych sensorycznych obiekty geometryczne. Dane dotyczące skanowanych punktów przechowywane są w rekordach złożonych z następujących pól:

- Odległość.
- Kąt.



Rys. 4: Przykład generacji ramki

Fig. 4: An example of frame generation

- Współrzędne X_r , Y_r robota.
- Orientacja robota.

(dwa ostatnie pola są wspólne dla całej grupy pomiarów dokonanych jednocześnie).

Wstępnym etapem tworzenia lokalnej mapy geometrycznej dla pojedynczego skaningu jest grupowanie punktów w celu wydzielenia pojedynczych obiektów. Polega ono na przeglądaniu listy zmierzonych punktów wg poniższego algorytmu:

```

begin
  NUMERGRUPY:=1 ;
  Punkt[i+1].Grupa:=NUMERGRUPY ;
  for i:=1 to IloscPunktow-1 do
    begin
      if Odleglosc(Punkt[i],Punkt[i+1]);ODLEGLOSCMAX then
        Punkt[i+1].Grupa:=NUMERGRUPY
      else
        begin
          NUMERGRUPY:=NUMERGRUPY+1 ;
          Punkt[i+1].Grupa:=NUMERGRUPY
        end
      end ;
    end .

```

gdzie :

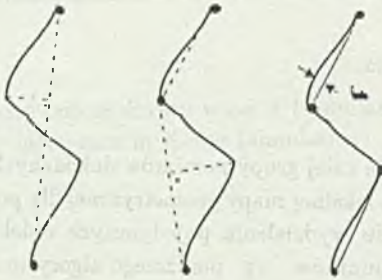
NUMERGRUPY — aktualny najwyższy numer grupy w obrazie z dalmierza

ODLEGLOSCMAX — największa odległość między kolejnymi punktami jednego skanu uznawana za dopuszczalną i nie powodująca przydzielenia punktu do nowej grupy

ILOSCPUNKTOW — ilość punktów w danym obrazie z dalmierza (skanie).

Punkt[i .Grupa] — numer grupy i -tego punktu

Wynikiem tego działania jest lista grup (w szczególności może być tylko jedna grupa), z których każda jest tablicą punktów pomiarowych. Lista ta jest weryfikowana - usuwane są grupy, w których ilość punktów jest mniejsza niż założone minimum. Grupy te są oznaczane jako klastry — niezdefiniowane geometrycznie obszary traktowane na mapie jako zajęte przez przeszkody prostokąty. Potrzeba takiego postępowania wynika z konieczności eliminacji przypadkowych, błędnych pomiarów. Każda pozytywnie zweryfikowana grupa jest traktowana jako łamana otwarta.



Rys. 5. Podział łamanej

Fig. 5. Broken line division

W celu wykrycia w tym obiekcie poszczególnych odcinków (jest to równoznaczne z wykryciem punktów załamania) stosowany jest algorytm iteracyjnego znajdowania punktów końcowych. Polega on na prowadzeniu prostej pomocniczej między początkowym i końcowym punktem łamanej i znajdowaniu punktu najbardziej od tej prostej odległego. Po jego odnalezieniu dokonywany jest w tym miejscu podział zmierzonych punktów na dwie grupy; dla każdej z nich stosowane jest identyczne postępowanie. Algorytm ten realizowany jest rekurencyjnie, tak długo, aż nie znajdzie żadnego punktu leżącego w odległości większej niż r_{min} od poprowadzonej prostej pomocniczej (rys. 5). Za pomocą doboru odległości r_{min} można regulować dokładność podziału obiektu-łamanej na odcinki.

W efekcie działania powyższego algorytmu otrzymujemy dla każdej grupy tablicę punktów podziałowych. Jest ona podstawą do dokonania dla każdego odcinka łamanej estymacji równania prostej, na której odcinek ten leży. Prostą w przyjętym układzie współrzędnych opisuje równanie liniowe $y = Ax + B$. Dokładność estymacji parametrów

równania prostej ma krytyczne znaczenie dla całego procesu tworzenia mapy geometrycznej. Metodą najprostszą jest metoda regresji liniowej. W metodzie tej współczynnik kierunkowy prostej A określamy na podstawie wzoru:

$$A = \frac{\sum y - B * \sum x}{n}$$

natomiast B wg następującej zależności:

$$B = \frac{n * \sum xy - \sum x * \sum y}{n * \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Poważną wadą tej metody jest mała odporność na błędy wynikające z niedokładności dalmierza IR. Pojedyncze błędne punkty pomiarów powodują duży błąd określenia współczynnika kierunkowego.

Lepsze wyniki daje metoda polegająca na filtracji modalnej. Filtracja taka polega na wyznaczeniu kierunków prostych dla kolejnych par punktów zmierzonych dalmierzem i budowie histogramu odzwierciedlającego liczbę wykrytych prostych w zależności od współczynnika kierunkowego A . Następnie jest wyznaczany kierunek występujący najczęściej. Filtracja taka dokonywana jest z pewną tolerancją, zależną od dokładności dalmierza. Wyznaczony kierunek jest przyjmowany jako kierunek prostej, na której leży badany odcinek łamanej otwartej. Współczynnik B jest obliczany jako średnia współczynników wyznaczonych dla wszystkich prostych, których współczynnik A mieści się w zakresie przyjętej tolerancji.

Końcowym etapem budowy mapy geometrycznej dla pojedynczego skaningu jest wyznaczenie końców odcinków składających się na łamaną. Dokonywane jest przez poszukiwanie punktów przecięcia prostych, na których te odcinki leżą (równania prostych wyznaczono w poprzednim kroku obliczeń). Punkt początkowy pierwszego odcinka łamanej i końcowy odcinka ostatniego jest wyznaczany przez przecięcie prostych, na których leżą te odcinki z prostymi do nich prostopadłymi i przechodzącymi odpowiednio przez pierwszy i ostatni punkt pomiarowy.

Otrzymane w wyniku powyższego postępowania odcinki zapisywane są jako rekordy zawierające współrzędne punktu początkowego, końcowego, kierunek prostej, na której dany odcinek leży, oraz współczynnik "ufności" dla danego odcinka odzwierciedlający liczbę punktów pomiarowych należących do niego oraz liczbę elementarnych prostych, które zmieściły się w tolerancji podczas testowania filtrem modalnym. Jeżeli ten współczynnik jest zbyt niski (próg jest ustalony doświadczalnie i zależy od konkretnego otoczenia robota), fragment obiektu jest opisywany nie jako odcinek, lecz kłaster.

Takie rekordy łączone są w grupy odpowiadające obiektom – łamanym i zapisywane w pojedynczej mapie lokalnej wraz z danymi pochodzącymi ze wstępnej analizy statystycznej – histogramami i ramką.

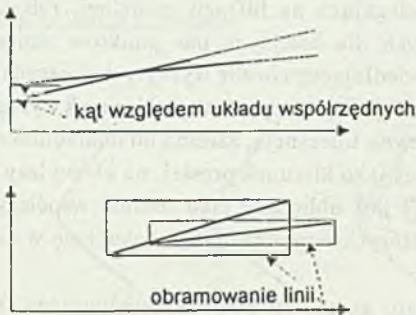
5.2. Agregacja

Kolejnym etapem tworzenia mapy geometrycznej jest agregacja (połączenie) informacji geometrycznej uzyskanej na podstawie kolejnych pomiarów dalmierzem z różnych pozycji robota.

Połączenie linii składa się z dwu etapów:

1. Korespondencja — czy rozważane elementy liniowe są częściami jednej większej całości.
2. Fuzja — aproksymacja linii z fragmentów.

Do wyselekcjonowania zbioru pokrywających się linii używana jest metoda przecinania się prostokątów [4]. Linie tylko wtedy mogą się pokrywać, gdy opisane na nich prostokąty się przecinają (rys. 6). Ustalenie orientacji składanych linii odbywa się w dwu etapach:



Rys. 6. Agregacja linii
Fig. 6. Line aggregation

1. Sprawdzenie, czy kąty w trójkątach tworzonych przez linie z osią X (odniesienia) nie różnią się bardziej, niż to założono.
2. Sprawdzenie, czy odległości euklidesowe końców linii mieszczą się w zakresie tolerancji.

Jeżeli elementy spełniają wymienione kryteria, można połączyć je w jedną linię. Jako końce linii przyjmuje się punkty elementów składowych leżące najdalej na zewnątrz na linii odniesienia. Orientacja jest średnią odcinków składowych. Otrzymana linia jest archiwizowana w postaci współrzędnych początku i końca oraz odpowiednich znaczników atrybutu. Wykryte linie otrzymują atrybut 'real'; jeżeli w danym kierunku nie wykryto linii do granicy zasięgu sensorów, umieszczana jest tam linia z atrybutem 'pseudo', ograniczająca obszar skanowany (w odległości równej d_{max} – zasięgowi dalmierza). Efekt otrzymany dla danych symulowanych przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Mapa geometryczna otrzymana jako wynik symulacji
Fig. 7. Geometrical map resulting from simulation experiment

6. Wnioski

Zaprezentowana praca przedstawia metodę przetwarzania danych sensorycznych na potrzeby nawigacji autonomicznego robota mobilnego. Przedstawiony system jest szczególnie przydatny dla generacji modelu świata w czasie pracy robota w nieznanym środowisku. Nie wymaga instalacji sztucznych markerów czy też dysponowania bazą danych z aprioryczną mapą otoczenia. Dostarcza bezpośrednio informacje na temat odległości robota od elementów środowiska.

Przedstawiona metoda i wykonane badania mogą być przydatne dla późniejszych realizacji określonych typów robotów użytkowych. Jako praktyczne zastosowanie można np. rozwinąć autonomiczną maszynę inspekcyjną, nadzorczą (automatyczny strażnik).

LITERATURA

- [1] G. Drunk *Sensor- und Steuerungssystem für die leitlinienlose Führung automatischer Flurförderzeuge* Springer-Verlag, Berlin 1990.
- [2] T. Edlinger, E. von Puttkamer, R. Trieb *Accurate Position Estimation for an Autonomous Mobile Robot Fusing Shaft Encoder Values and Laser Range Data*.
- [3] M. Buchberger, K. Jörg, E. von Puttkamer *Weltmodellierung und Bewegungssteuerung zur Kollisionvermeidung des Autonomen Mobilien Roboters MOBOT-IV*.
- [4] T. Knieriemen *Autonome Mobile Roboter* Wissenschaftsverlag, Mannheim 1991.
- [5] P. Skrzypczyński, A. Woźniak *Mapy geometryczne otoczenia robota mobilnego* Czwarta Krajowa Konferencja Robotyki, Wrocław 1993.

Recenzent: Prof.dr inż. Henryk Kowalowski

Wpłynęło do Redakcji do 30.04.1994 r.

Abstract

In this work methods of geometrical cartography are presented. Methods of primary interpretation for IR range finder data are presented. Products of this methods implementation are angle and X-Y histograms. These histograms plays a role in geometrical data agregation. The conception of the multisensor data fusion is included. This fusion use data from IR range finder and the group of sonar sensors. The fusion rules are :

- Elimination of contradictions.
- Redundancy minimalisation.
- Correct data maximalization.

The algorithms of the line matching are developed. There are three steps of the matching the geometric objects from raw data.

- Points grouping.
- Broken lines division.
- Section estimation.

As the last step of map creating the data aggregation is presented. The results of simulations are included.