

Paweł Hyla, Janusz Szpytko, Rafał Rumin, Jacek Cieślik, Jędrzej Blaut

Autonomiczne jednostki transportowe AGV w transporcie technologicznym

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2019.070

Data zgłoszenia: 15.12.2018

Data akceptacji: 08.02.2019

W artykule została omówiona tematyka związana z szeregiem aspektów dotyczących zastosowania naziemnych autonomicznych pojazdów transportu technologicznego. Uwaga autorów w głównej mierze została zwrócona w kierunku zagadnień związanych z lokalizacją środka transportu technologicznego w przestrzeni roboczej, planowaniem trajektorii ruchu dla potrzeb realizacji zadania transportowego, możliwościami technicznymi w mapowaniu przestrzeni roboczej oraz inteligentnych metoda sterowania pojazdami typu AGV ukierunkowanych na efektywność. Artykuł w sposób syntetyczny zbiera kluczowe informacje dotyczące kluczowych aspektów związanych z efektywnym zarządzaniem zarówno pojedynczymi pojazdami AGV jak i całymi ich zespołami.

Słowa kluczowe: AGV, transport technologiczny, efektywność transportu

Wstęp

W transporcie technologicznym osadzonym we współczesnych realiach zglobalizowanej konkurencji, szczególną rolę odgrywają narzędzia powiązane z wszelkimi inteligentnymi rozwiązaniami. Techniki implementowane w transport technologiczny ewoluują i są w dalszym ciągu stale i dynamicznie udoskonalane. Jest to wynik dążenia do realizowanego w czasie rzeczywistym dynamicznego dysponowania flotą urządzeń zarówno w podejściu mikro jak i makro [1] rozwiązań dla potrzeb zintegrowanych zautomatyzowanych przedsiębiorstw o charakterze transportowo-produkcyjnym [2, 3]. Współcześnie zagadnienie „inteligentnego” zarządzania flotą transportową jest tematem szeregu publikacji zarówno o charakterze naukowym jak i branżowym. Poruszana tematyka jest związana głównie z zastosowaniem inteligentnych rozwiązań ukierunkowanych na szeroko rozumianą efektywność urządzeń, oprogramowania i czynnika ludzkiego [4]. Z opisywanego połączenia fizycznych systemów transportowych i wszelkich elementów wspomagających je inteligentnymi rozwiązaniami, wylania się obraz jednego spójnego e-systemu transportowego, którego nadrzędnym zadaniem jest szeroko rozumiana adaptacja i ewolucja, umożliwiająca stały nieustanny rozwój w kierunku zaobserwowanych jak i przewidywanych trendów. Ekspansja e-systemów wymaga przetwarzania dużej ilości informacji realizowanej w czasie rzeczywistym, związanej głównie z zadaniami lokalizacji poszczególnych aktorów wchodzących w skład systemów transportowych przez system nadzorujący, jak również samo lokalizację (auto lokalizację) każdego autonomicznego pojazdu wchodzącego w skład danego autonomicznego systemu transportu technologicznego. Umiejętność określenia bieżącego położenia pojazdu w przestrzeni roboczej stanowi kluczowe zagadnienie w kształtowaniu efektywności transportu technologicznego.

W artykule przedstawiono problematykę związaną z nawigowaniem autonomicznych środków transportowych rozumianą jako kombinację wszelkich podjętych działań, które dotyczą zagadnień związanych z lokalizacją lub auto lokalizacją, jak również problematyki

wyznaczania trajektorii ruchu, zagadnień związanych ze sterowaniem oraz pozyskiwaniem informacji o otoczeniu poprzez pojazd autonomiczny typu AGV.

1. Autonomiczne jednostki transportowe – krótki rys historyczny

Za pierwszy w pełni funkcjonalny autonomiczny pojazd AGV (ang. *Autonomus Guided Vehicle*) przeznaczony do zadań transportu technologicznego uważa się konstrukcję zaprojektowaną w 1954 roku [5]. Urządzenie transportowe poruszające się bez kierowcy zaprojektowane przez firmę Barrett Electronics transportowało ładunki wewnątrz magazynu w stanie Północna Karolina w USA. Problem nawigowania autonomicznym pojazdem został rozwiązany poprzez zamontowanie na stałe szyn i przewodów zasilających, które zostały wmontowane w betonową posadzkę magazynu. Sposób poruszania się pojazdu został ograniczony w sposób mechaniczny.

W tej samej dekadzie został wynaleziony i opatentowany pierwszy bezprzewodowy system nawigacji używający systemu laserowego. W rozwiązaniu zastosowano specjalnie zaprojektowane odbłyśniki, które po rozmieszczeniu w całym magazynie, umożliwiły wytyczenie kursu pojazdu. Podstawowe koordynaty przestrzeni roboczej magazynu po wgraniu do pamięci AGV wraz z zaprogramowaną ścieżką przejazdu były korygowane na bieżąco w odniesieniu do napotkanego markera o znanych współrzędnych. Technologia laserowej nawigacji była nieustannie rozwijana w ostatnim stuleciu. Kwintesencje tej formy nawigacji w pojazdach AGV stanowi wyposażenie pojazdu w zintegrowaną głowicę skanującą. Głowica skanująca jest wyposażona w laserowy skaner odległości działający dookoła w polu 360 stopni. W urządzeniu wiązka lasera pada na szybkoobrotowe lustro o specjalnym profilu. W efekcie integracji ruchu obrotowego z pojedynczą wiązką lasera, uzyskuje się jej załamanie i powstaje linia laserowa, która skanuje obiekt. Ruch obrotowy całej głowicy, tworzy wirtualną mapę otoczenia w postaci chmury punktów do których urządzenie zmierzyło odległość. Ilość punktów stanowi o rozdzielczości skanu, a tym samym o dokładności trójwymiarowego modelu.

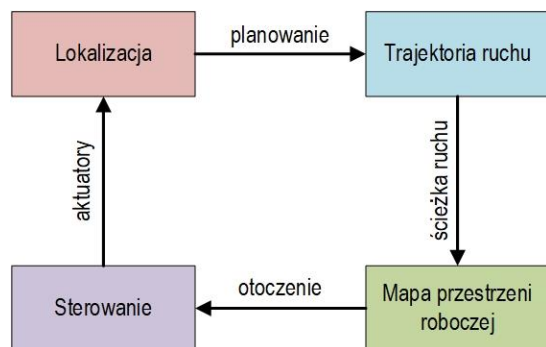
Dopiero w połowie lat 90-tych ostatniego stulecia w urządzenia typu AGV została zaimplementowana nowa forma bezstykowej nawigacji oparta o działanie żyroskopu. W tej technologii podłoga hali magazynowej musi zostać wyposażona w magnetyczne markery każdy o unikatowych koordynatach x, y służącymi do korekcy ewentualnych błędów lub odnalezienia właściwego kursu po jego nieoczekiwanej zmianie. Zaletę opisywanego systemu stanowi możliwość zastosowania wielu autonomicznych urządzeń transportowych wraz z możliwością ich wzajemnej integracji.

2. Problematyka nawigacji we współczesnych pojazdach typu AGV

Na podstawie danych historycznych jak i współcześnie znanych problemów, można na nowo zdefiniować zagadnienie problematyki nawigacji w autonomicznych jednostkach transportowych. Przede wszystkim problematyka nawigacji w odniesieniu do pojazdów typu AGV oraz UTD (ang. *Unmanned Transport Devices*) tak kiedyś jak i

dziś, wymaga zdefiniowania układu odniesienia (lokalnego lub globalnego), cech środowiska, w którym pracuje urządzenie transportowe, które może przejawiać cechy statyczne, dynamicznie zmienne lub hybrydowe posiadające zarówno obie te cechy w różnych proporcjach. Dodatkowo przy planowaniu nowego systemu trzeba założyć czy dla potrzeb lokalizacji istnieje możliwość wykonania dodatkowych ruchów roboczych niezwiązanych z optymalną, zaprogramowaną trajektorią ruchu (metody pasywne i aktywne). Najogólniej problem nawigacji środka transportu technologicznego jakim jest autonomiczny pojazd transportowy można przedstawić jako kombinację (rys.1) następujących posobnych działań typu [6-8]:

- autonomiczna lokalizacja i/ lub auto lokalizacja,
- wyznaczenie optymalnej trajektorii ruchu pod względem przyjętej funkcji celu z zastosowaniem odpowiednich algorytmów,
- dystrybucją informacji związanej z informacją o przestrzeni roboczej w której znajduje się dany środek transportu i/ oraz pomiędzy samymi środkami transportu technologicznego,
- realizowaniem odpowiedniej strategii sterowania mechanizmami odpowiedzialnymi za aktywatory urządzenia przy zastosowaniu odpowiednio dobranych metod i narzędzi.



Rys. 1. Schemat systemu nawigacji naziemnych autonomicznych pojazdów transportu technologicznego

3. Lokalizacja w pojazdach AGV

Konieczność ustalenia pozycji urządzenia transportowego koegzystującego w ramach każdego systemu transportowego stanowi sprawę bezdyskusyjną i podstawową. Podstawowy problem w lokalizacji pojazdów AGV jest związany z wyborem odpowiedniego układu odniesienia, który może stanowić układ lokalny lub globalny. Za zastosowaniem układu lokalnego przemawia stosunkowo łatwa implementacja i niska cena implementacji, natomiast jego wadę stanowi możliwość zastosowania tylko na względnie małym obszarze ze zdefiniowanym punktem startowym. Niedogodności związane z zastosowaniem globalnego układu odniesienia niweluje zastosowanie globalnego układu odniesienia. W tym systemie pozycja urządzenia jest obliczana bez potrzeby znajomości punktu startowego. Dodatkowo tryb lokalizacji globalnej nie jest tak podatny na zakłócenia jak tryb lokalizacji lokalnej oraz jest odporny na nieplanowane wyłączenia systemu następujące np. w przypadku awarii. Istotną wadą trybu lokalizacji globalnej jest złożoność niezbędnych procedur obliczeniowych. Abstrahując od ceny urządzeń, algorytmy desygnowane do realizacji globalnej lokalizacji realizowanej w trybie czasu rzeczywistego wymagają zaangażowania względnie wysokiego poziomu mocy obliczeniowej. Dodatkowo w fazie projektowania systemu nawigacji pojazdów sterowanych autonomicznie niezależnie od przyjętego układu odniesienia, konieczne jest podjęcie decyzji o zastosowaniu pasywnych lub aktywnych rozwiązań. W trybie pasywnym jednostka transportowa nie może wykonać dodatkowego ruchu służących lokalizacji. W trybie aktywnym urządzenie transportowe ma możliwość wykonania dodatkowego ruchu w celu wyeliminowania niejednoznaczności swojego położenia. Aktywna lokalizacja jest

szczególnie przydatna, gdy do lokalizacji używa się systemów wizyjnych, ponieważ obraz z kamer może być podatny na zakłócenia, wtedy wykonanie dodatkowego zdjęcia z innej perspektywy jest niezbędne i może być bardzo pomocne. Współcześnie istnieje wiele technologii umożliwiających pasywną oraz aktywną lokalizację. Dla tego celu są dedykowane rozwiązania typu:

- nawigacja odometryczna; Ten rodzaj systemu nawigacyjnego zbiera dane z ruchomych czujników, aby oszacować (nie określić) przybliżoną pozycję urządzenia w danym okresie czasu,
- nawigacja inercyjna; Jest to tzw. system nawigacyjny typu „dead reckoning”, który oblicza pozycję na podstawie czujników ruchu. Po ustaleniu początkowego punktu odniesienia system otrzymuje impulsy z detektorów ruchu, które mierzą przyspieszenie wzdłuż trzech osi ruchu, umożliwiając tym samym dokładne obliczenie aktualnej pozycji,
- trilateracja; Metody tego typu obejmują wyznaczanie bezwzględnych lub względnych lokalizacji punktów za pomocą pomiaru odległości przy użyciu geometrii wycinka sfery lub trójkątów (systemy nawigacji satelitarnej typu GPS, GLONASS, Galileo),
- triangulacja. Jest procesem określania położenia punktu poprzez pomiar kątów względem znanych stałych punktów odniesienia lub linii bazowej,
- definiowanie pozycji za pomocą sztucznych znaczników (markerów) znajdujących się w obszarze przestrzeni roboczej emitujących sygnał lokalizacyjny tzw. wewnętrzny GPS (ang. *internal GPS*),
- metody wizyjne; Najbardziej uniwersalne. Ich zastosowanie może się opierać zarówno na trybie aktywnym jak i pasywnym. Dodatkowo dochodzi również tryb hybrydowy. W trybie aktywnym urządzenie transportowe przy pomocy głowicy lub głowicy wyposażonej w zestawy kamer generuje cyfrową mapę otoczenia. Na podstawie napotkanych przeszkód generowana jest trajektoria ruchu. W trybie pasywnym urządzenie transportowe posiada cyfrową mapę przestrzeni roboczej wgraną do pamięci, a przejazd odbywa się na zasadzie odnajdywania i dopasowania ścieżki ruchu do zaprogramowanego wzorca. Tryb hybrydowy umożliwia aktualizację posiadanej w pamięci cyfrowej mapy przestrzeni roboczej.

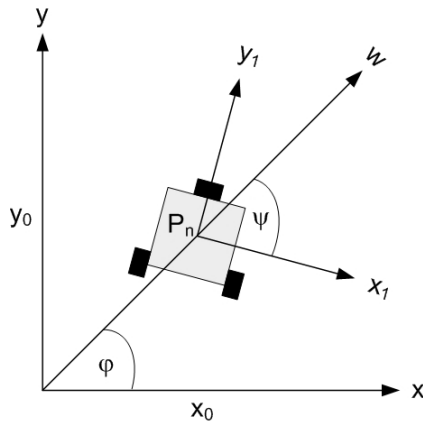
4. Metody planowania trajektorii ruchu

Główna zasada planowania trajektorii dla pojazdów AGV polega na planowaniu ścieżki ruchu w oparciu o wyznaczone cele wraz uwzględnieniem ograniczeń. Zaprojektowana ścieżka ruchu musi prowadzić urządzenie transportowe od punktu startowego (punkt początkowy zadania) do punktu docelowego (punkt końcowy zadania), uwzględniając konfigurację urządzenia, konstrukcję i wymiar transportowanego ładunku. Zazwyczaj ścieżki ruchu dla pojazdów autonomicznych planuje się za pomocą określonego kryterium optymalizacji z wyraźnie określoną funkcją celu. Większość kryteriów optymalizujących w procesie projektowania trajektorii można podzielić ze względu na trzy podstawowe kryteria:

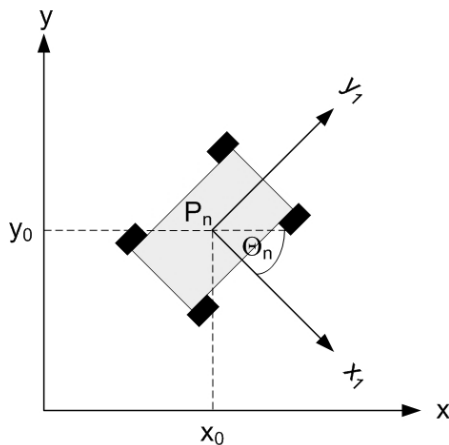
- kryterium trasy (minimalizacja długości przejazdu),
- kryterium czasu (najkrótszy czas realizacji zadania),
- kryterium energetyczne (minimalizacja kosztów energii związanych z realizacją działania).

Możliwe jest wyrażenie innych istniejących kryteriów za pomocą powyżej przedstawionych przy pomocy ich parowania. Jednakże fundamentalny problem planowania ścieżki ruchu polega na poszukiwaniu krzywej przejścia pomiędzy punktem początkowym, a końcowym. Poszukiwana trajektoria musi uwzględniać ograniczenia związane z przeszkodami (ruch nie może powodować kolizji) i musi także uwzględniać ograniczenia kinematyczne pojazdu autonomicznego.

Pod względem kinematyki ruchu z grupy pojazdów UGV (ang. *Unmanned Ground Vehicles*) można wyróżnić pojazdy typu holonomicznego (Rys. 2) oraz z nieholonomiczną strukturą kinematyczną (Rys. 3). Możliwości manewrowania pojazdami AGV z nieholonomiczną strukturą kinematyczną można porównać do tradycyjnej konstrukcji współczesnego samochodu wyposażonej w dwie osie z których jedna jest napędzana. Osobną sprawą dotyczy możliwości manewrowych związanych z skrętem kół, który może być realizowany poprzez jedną albo nawet dwie osie jednocześnie.

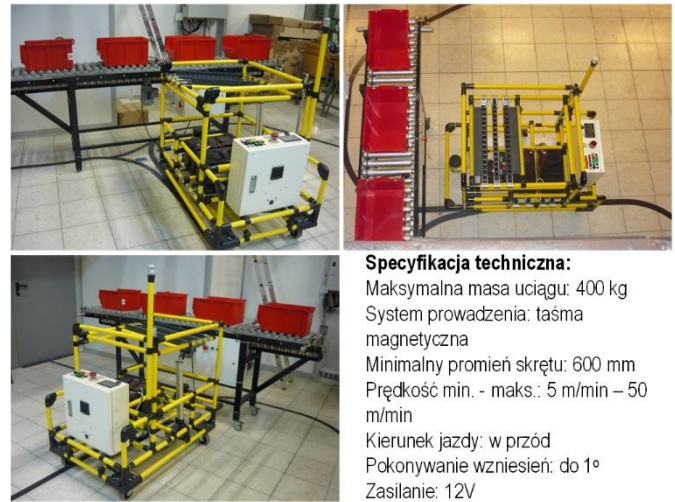


Rys. 2. Schemat kinematyki pojazdu z holonomicznym układem kinematycznym



Rys. 3. Schemat kinematyki pojazdu z nieholonomicznym układem kinematycznym

Druga grupa naziemnych pojazdów autonomicznych może posiadać układ holonomiczny (Rys. 3). Układ holonomiczny ma znacznie większe możliwości manewrowe (np. promień skrętu) w porównaniu do układu nieholonomicznego. Pojazd wyposażony w holonomiczny układ napędowy ma możliwość obrotu wokół swojej osi poprzez zablokowanie jednego koła i realizowanie ruchu kołem leżącym naprzeciwko. Dodatkowo pojazdy tego typu mogą posiadać napęd działający jednostronnie bez możliwości włączenia biegu wstecznego, gdyż istnieje możliwość ich obrotu o 180 stopni, co znacznie upraszcza całą konstrukcję mechanizmu jazdy. Na rysunku 4 przedstawiono pojazd AGV z Laboratorium Zautomatyzowanych Środków Transportu Technologicznego i Telematyki AGH z takim właśnie rozwiązaniem konstrukcyjnym. Obecnie istnieje silny trend w którym pojazdy z więzami nieholonomicznymi stosowane są wszędzie tam gdzie przemieszczane są ładunki o znacznym tonażu (centra logistyczne, terminale kontenerowe, itp.), natomiast pojazdy holonomiczne obsługują małe magazyny i linie produkcyjne.



Specyfikacja techniczna:

Maksymalna masa uciążu: 400 kg
 System prowadzenia: taśma magnetyczna
 Minimalny promień skrętu: 600 mm
 Prędkość min. - maks.: 5 m/min – 50 m/min
 Kierunek jazdy: w przód
 Pokonywanie wzniesień: do 1°
 Zasilanie: 12V

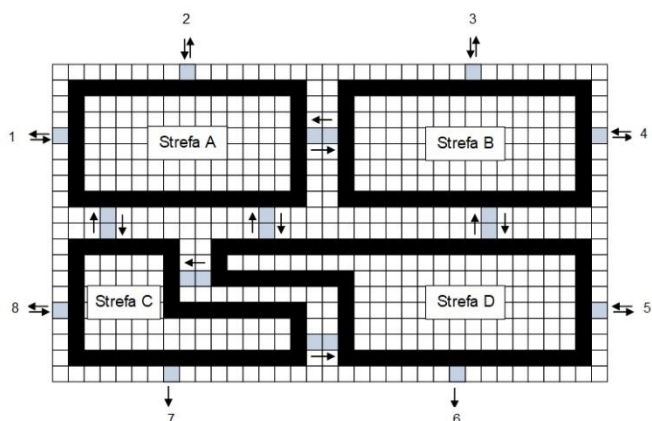
Rys. 4. Autonomiczny wózek transportowy o konstrukcji modułowej ramowej z holonomicznym układem kinematycznym (Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie – Wydział Inżynierii Mechanicznej Robotyki - Laboratorium Zautomatyzowanych Środków Transportu Technologicznego i Telematyki)

4.1. Charakterystyka metod planowania trajektorii ruchu dla pojazdów autonomicznych typu AGV

Większość rozwiązań dotyczących metod projektowania trajektorii dla naziemnych pojazdów autonomicznych opisywanych w literaturze naukowej jest w jakimś sensie oparta na metodach sztucznej inteligencji (ang. *Soft Computing Method*). Przykład tutaj może stanowić zastosowanie logiki rozmytej (ang. *Fuzzy Logic*) [9-11], algorytmów heurystycznych [12] oraz narzędzi hybrydowych integrujących logikę rozmytą wraz z sieciami neuronowymi [13, 14]. Do rozwiązania problemu projektowania trajektorii wykorzystuje się często również algorytmy genetyczne [6, 15] oraz algorytmy odnalezienia optymalnej ścieżki przejścia typu A^* Star wraz z całą rodziną pochodnych rozwiązań. Zastosowanie znajdują algorytmy takie jak: D^* , *Field D**, *IDA**, *Fringe Saving A** (*FSA**), *Uogólniona Adaptacyjna A** (*GAA**), *Theta** [16]. W zależności od dostępności informacji o otoczeniu i rodzaju zastosowanego środka transportu technologicznego, możliwe jest podzielenie metod planowania trajektorii ruchu na trzy grupy. Podział ten uwzględnia sposób podejścia do problemu, tak więc różnić można metody globalne, lokalne oraz hybrydowe. W metodach globalnych zwykle stosuje się wyidealizowany model urządzeń transportowych, a przestrzeń robocza jest nierekonfigurowana i niezmienna w czasie. Wszelkie zmiany zachodzące w przestrzeni roboczej są rejestrowane ze szczególną starannością i następnie archiwizowane w systemach bazodanowych. Algorytm planowania trajektorii ma dostęp zarówno do bazy danych jak i pierwotnego modelu przestrzeni roboczej. W finalnej ocenie elastyczność metody wydaje się być bardzo niska, dodatkowo do jej poprawnego działania i realizacji potrzeba zaangażować dużo mocy obliczeniowej. Zazwyczaj metody globalne są metodami typu off-line, a ich głównym celem jest wstępne określanie możliwych do uzyskania trajektorii ruchu. Natomiast metody lokalne stanowią przeciwieństwo metod globalnych i mogą być stosowane również w trybie on-line. W metodach lokalnych ścieżka ruchu urządzenia jest utworzona na podstawie aktualnego stanu bazy danych, która zawiera zarówno współrzędne lokalizacji pojazdu jak i aktualną konfigurację wszelkich możliwych przeszkód. Generowana trajektoria ruchu z zastosowaniem metody lokalnej jest zwykle nieoptymalna, ale ta niedogodność może zostać zrekomensowana przez możliwość zastosowania metody do oceny przestrzeni roboczej, która się dynamicznie zmienia. Ostatnia grupa metod to grupa metod hybrydowych służących do planowania trajektorii. Metody hy-

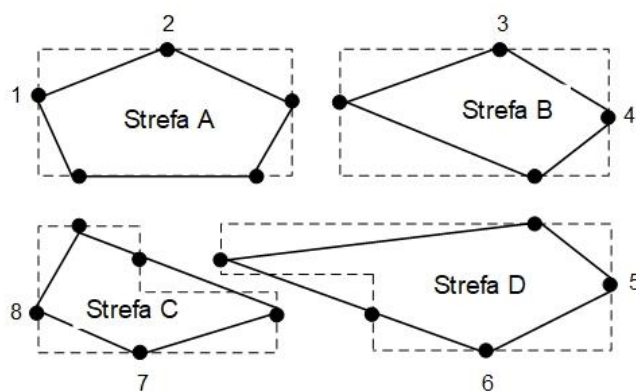
brydowe stanowią kombinację metod globalnych i lokalnych projektowania trajektorii ruchu. Przy pomocy metod hybrydowych planowanie trajektorii jest bardziej wydajne i może mieć charakter interakcyjności. Urządzenie transportowe w trybie autonomicznym ma możliwość porównania aktualnie panujących warunków przestrzeni roboczej z cyfrowym modelem przestrzeni roboczej zapisanym w pamięci. W przypadku wykrycia niezgodności, wstępnie zaplanowana trajektoria zostaje skorygowana. Trajektoria ruchu zmienia się tylko w określonym fragmencie, natomiast po jego skorygowaniu urządzenie wraca na poprzednio wybrany kurs. Podsumowując, metody hybrydowe łączą przewagę lokalnego i globalnego planowania metod trajektorii z jednoczesnym wyeliminowaniem większości słabych punktów metody globalnej oraz lokalnej.

Innym sposobem na podział metod planowania trajektorii stanowi kryterium sposobu wyodrębniania odpowiedniej trajektorii. W omawianym przypadku można wyróżnić metody topologiczne oraz metody rastrowe. Metody topologiczne przekształcają pierwotny model przestrzeni roboczej analizując wszystkie możliwe drogi przejścia (również te niemożliwe w realizacji). W następstwie powstaje wiele różnorodnych trajektorii ruchu, które można opisać jako graf różnorodnych rozwiązań. Przykładem ilustrującym działanie metody rastrowej jest algorytm Tabu Search [6, 17]. Metoda TS znalazła zastosowanie w rozwiązywaniu m.in. problemu komiwojażera. Istota działania algorytmu polega na przeszukiwaniu wszystkich możliwych kombinacji ścieżek przejść (wliczając także te niemożliwe w realizacji).

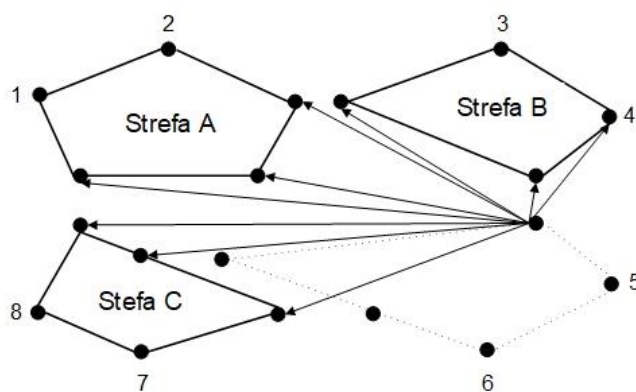


Rys. 5. Model przestrzeni roboczej magazynu dla potrzeb wizualizacji działania algorytmu topologicznego typu TS

Na rysunku 5 przedstawiono wirtualny magazyn składających się z czterech stref. Wyróżnić można strefę A, B, C oraz D. Strefa A posiada drogi dojazdowe łączące ze wszystkim trzema pozostałymi strefami magazynowymi, strefa B jest połączona tylko ze strefą A oraz D, strefa C posiada połączenie tylko ze strefą A i D, natomiast strefa D jest równoważna strefie A pod względem ilości kombinacji możliwych przejść. W następnej fazie algorytm na bazie modelu przestrzeni roboczej (rys. 5) generowany bardziej czytelny model funkcjonalny (rys. 6.). Wylonienie rozwiązania optymalnego jest realizowane na podstawie grafu otrzymanego z przekształcenia modelu funkcjonalnego do postaci modelu topologicznego z widocznymi wszystkimi możliwościami rozwiązania zadanego problemu. Na rysunku 7 zaprezentowano graf wizualizujący wszystkie możliwe ścieżki przejścia ze strefy D do innych stref roboczych przy pomocy diagramu.

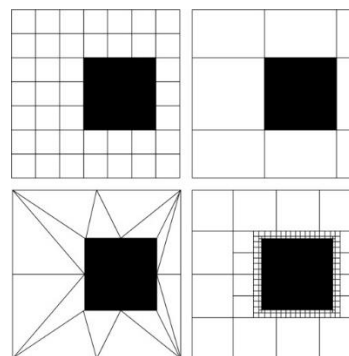


Rys. 6. Pierwsza faza działania algorytmu TS: przekształcenie funkcjonalne



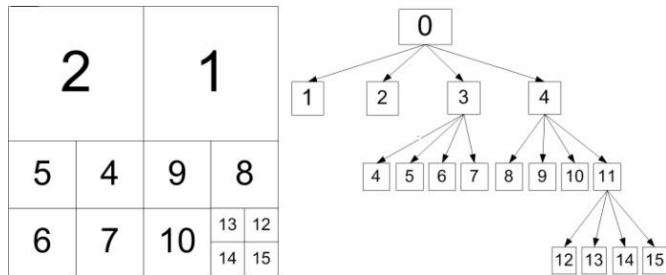
Rys. 7. Rozwiązanie problemu metodą TS przedstawione w postaci grafu.

Całkiem inne podejście można zaobserwować w metodach rastrowych. Metody rastrowe opierają się na metodach geometrycznego wyodrębnienia właściwej (optymalnej) trajektorii ruchu. Metody rastrowe polegają na podziale przestrzeni roboczej magazynu na siatkę komórek elementarnych. Komórka elementarna siatki może mieć regularny lub nieregularny kształt (rys. 8). W następnej fazie następuje rozmieszczenie przeszkód i wpasowanie ich do siatki komórek. W sytuacji gdy któraś z komórek nie posiada jednoznacznego przypisania typu pusta lub pełna, następuje dalszy podział komórki elementarnej na mniejsze elementy aż do chwili gdy uda się jednoznacznie określić czy jest pusta lub pełna. Po alokacji przeszkód w komórki elementarnej oraz naniesieniu na mapę rastrową niedostępnych miejsc, uwzględnieniu wymiarów gabarytowych urządzenia transportowego oraz transportowanego ładunku, wstępna trajektoria ruchu może zostać wytyczona.



Rys. 8. Przykładowe sposoby podziału przestrzeni roboczej przy pomocy siatek elementarnych o regularnych oraz nieregularnych kształtach

Algorytmem rastrowym jest tzw. metoda Quad-Tree [18]. W tej metodzie cała przestrzeń robocza jest podzielona na cztery pola kwadratowe. Każde pole ma przypisane do siebie jeden z trzech stanów: pusty, pełny lub mieszany. W przypadku przypisania statusu „mieszany”, pole dzieli się na mniejsze kwadraty i powtarza się całą procedurę od początku. Algorytm działa do chwili aż każda komórka nie osiągnie statusu „pusta” lub „pełna”. Algorytm tworzy konstrukcję przypominającą swoimi rozgałęzieniami drzewo (stąd jego nazwa Quad-Tree), którego każdy wierzchołek jest punktem wykresu przeznaczonym do ewentualnego wyszukiwania. Następnym krokiem działania algorytmu określa, czy i jakie rodzaje pól ze sobą sąsiadują. Kiedy sąsiadują ze sobą pola o tym samym statusie, można zaplanować trajektorię ruchu pojazdu w wybranym fragmencie trasy [8].



Rys. 9. Działanie algorytmu rastrowego typu Quad-Tree na przykładzie strefy roboczej z wydzielonymi 15 komórkami

5. Mapowanie przestrzeni roboczej

Cyfrowe mapy przestrzeni roboczej są wykorzystywane do określania położenia autonomicznego środka transportu w przestrzeni roboczej oraz do wizualizacji dynamicznych zmian zachodzących w magazynie dla potrzeb np. planowania trajektorii [19]. Zaletą cyfrowej mapy przestrzeni roboczej jest pomoc w ocenie położenia przeszkody co wpływa na zwiększenie precyzji ruchów urządzeń transportowych kooperujących w ramach wspólnej przestrzeni roboczej. Jednak mapy przestrzeni roboczej na ogół reprezentują stan w momencie ich powstania. W tej dziedzinie głównym problemem stanowi opracowanie rozwiązań i procedur wspierających metody pozyskiwania informacji o przestrzeni roboczej w czasie rzeczywistym [20]. W krótkim opisie mapowanie przestrzeni roboczej można opisać jako zestaw czynności podejmowanych w celu: gromadzenia informacji o otoczeniu, opisu jego kubatury, pozyskania informacji o poziomie zapelnienia, poznania stref pracy innych urządzeń transportowych, wytyczenia stref bezpieczeństwa w których mogą przebywać ludzie. W celu zwiększenia liczby pojazdów AGV działających w ramach jednej przestrzeni roboczej konieczne jest opracowanie systemu, umożliwiającego ich wzajemną kooperację. W tym celu opracowano kilka rodzajów systemów i koncepcji. Jednym z podstawowych systemu kooperacji jest system SLAM (ang. *Simultaneous Localization and Mapping*) [7, 21]. Jest to technika służąca do celów jednoczesnej lokalizacji i mapowania. System SLAM może pracować w dwóch trybach: w trybie poruszania się budowania mapy środowiska roboczego w warunkach nieznanych (bez wiedzy *a priori*) lub w trybie aktualizacji danej mapy (ocena *apriorystyczna*). Systemy typu SLAM nie są jedynymi narzędziami wspierającymi proces uzyskiwania cyfrowej mapy otoczenia środka transportu technologicznego. W Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie opracowano system precyzyjnego mapowania przestrzeni pracy laboratoryjnej suwnicy pomostowej (rys. 10-11). W opisywanym rozwiązaniu [22] głowica skanująca została wyposażona w obrotowy skaner laserowy 3D. Na podstawie otrzymanej chmury punktów poddanej



Rys. 10. Zdjęcie hali technologicznej z zaznaczonymi punktami kontrolnymi



Rys. 11. Fragment trójwymiarowego modelu odwzorowania hali technologicznej z widocznymi markerami

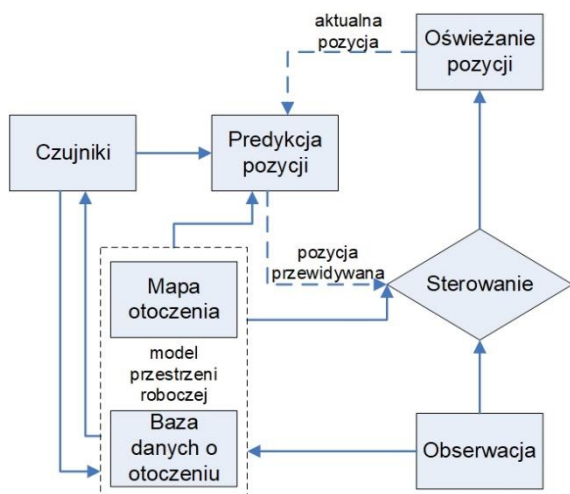
Obróbce, uzyskano trójwymiarowy model przestrzeni roboczej laboratoryjnej suwnicy pomostowej. Dla porównania na rysunku 10 przedstawiono zdjęcie obiektu z widocznymi czterema markerami kontrolnymi, natomiast na rysunku 11 przedstawiono fragment skanu wskazujący ten sam obszar. Uzyskana dokładność odwzorowania jest wysoce zadawalająca. Wadę metody stanowi jej wysoka czasochłonność oraz kosztowność.

Dodatkowo dla potrzeb mapowania przestrzeni roboczej możliwe jest zastosowanie innych rozwiązań m.in. zbioru technik typu CV (ang. *Computer Vision*) [23]. Obszernie obecnie dział wiedzy typu CV koncentruje się na możliwości uzyskania informacji na temat otaczającej rzeczywistości przy pomocy różnorodnych technik połączonych z analizą obrazu. Przetworzone dane w CV mogą przybierać różne formy: od pojedynczego obrazu, poprzez widoki z wielu kamer (stereowizja), aż po sekwencje wideo rejestrowane w czasie rzeczywistym. Obecnie w CV istnieje silny trend stosowania innych niż zdjęcia źródeł informacji na temat otoczenia takich jak: ultradźwięki, światło podczerwone, promieniowanie RTG oraz inne.

6. Metody i algorytmy w zarządzaniu i sterowaniu flotą pojazdów AGV

Problematyka poszukiwania niezawodnych metod służących do sterowania pojazdami typu AGV jest przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych [24-27]. Obecnie istniejące i zaimplementowane rozwiązania [28] są w większości dedykowane na potrzeby systemów produkcyjnych. Podstawowy schemat systemu sterowania dla

naziemnych jednostek autonomicznych przedstawiono na rysunku 12.



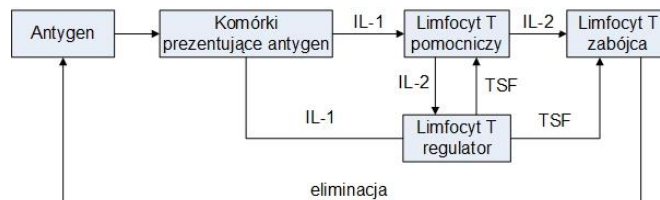
Rys. 12. Schemat blokowy systemu sterowania pojazdami typu AGV

W naziemnych jednostkach autonomicznych sterowanie jest bezpośrednio związane z potrzebą obserwacji otoczenia oraz auto lokalizacją. Predykcja pozycji pojazdu autonomicznego może być przewidywana na podstawie aktualnych danych pochodzących z czujników jak i też na podstawie mapy otoczenia i bazy danych o obiektach.

Podstawowym rozwiązaniem służącym dla potrzeb zarządzania i sterowania flotą pojazdów bezzałogowych są rozwiązania oparte o Elastyczne Systemy Wytwarzania typu FMS (ang. *Flexible Manufacturing Systems*). FMS to system produkcyjny, w którym flota pojazdów, system transportu oraz materiały są w głównej mierze kontrolowane przez komputer centralny [29]. W opisywanym modelu, za ruchy pojazdów AGV odpowiedzialna jest niska (lokalna) warstwa sterująca, a wyższa warstwa kontrolna odpowiada za planowanie trajektorii i harmonogramowanie pracy. Kontrola nadrzędna ma dodatkowo możliwość wykorzystania swoistej bazy danych w procesie nadzoru pracy pojazdów AGV.

Inna idea zarządzania flotą pojazdów AGV polega na zastosowaniu systemów typu MAS (ang. *Multi Agent System*). Systemy MAS bazują na modelowaniu zachowania społecznych zbiorowych form życia i wdrażaniu ich w systemy transportowe. Jeden z pierwszych systemów MAS został zbudowany na bazie interpretacji zachowania kolonii mrówek [29]. W przedstawionym algorytmie znajduje się kompletne rozwiązanie związane z projektowaniem trajektorii oparte na zachowaniu mrówek w mrowisku. W życiu mrówek ścieżka od gniazda do źródła pokarmu jest problemem optymalizacji typu TSP (ang. *Travelling Salesman Problem*), podobnym do algorytmu wyszukiwania Tabu Search (TS) opisanym w rozdziale czwartym.

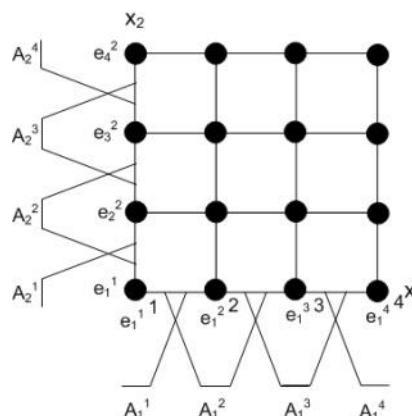
W światowej literaturze naukowej można zauważyć również próby adaptacji lub modyfikacji znanych metod sterowania przy pomocy nowych algorytmów. Jako przykład stanowić może standardowy regulator typu PID (ang. *Proportional-Integral-Derivative*) wzbogacony o samoadaptacyjny mechanizm oparty o zasady działania układu odpornościowego organizmów żywych [30]. Układ odpornościowy to układ struktur i procesów biologicznych w organizmie, który chroni przed chorobami poprzez identyfikację i eliminację patogenów.



Rys. 13. Algorytm działania układu odpornościowego

Główną rolą systemu odpowiedzi immunologicznej (rysunek 13) jest stymulowanie makrofagów i komórek T do eliminacji nierozpoznanych komórek. Komórka T składa się z trzech części (komórka limfocytowa typu T_s , T_h i T_k), gdzie T_s kontroluje odpowiedź immunologiczną, T_h pomaga w innych częściach, a T_k niszczy materiał patogenny. System sterowania PID wzbogacony o reguły systemu immunologicznego został zaprojektowany dla potrzeb bezzałogowego transportera kontenerowego typu UCT (ang. *Unmanned Container Transporter*). W pojeździe UTC używanym w porcie do transportu kontenerów zestaw różnych czujników (magnetycznych, ultradźwiękowych oraz emitujących podczerwień) jest wykorzystywany do wykrywania przeszkód, natomiast sterowanie PID z modulem HIA (ang. *Humor Immune Algorithm*) odpowiada za sterowanie urządzenia przy zastosowaniu systemu wizyjnego śledzącego żółto-czarne markery w postaci linii naniesionych na płytę terminala kontenerowego. Wszelkie zakłócenia pojawiające się w systemie są likwidowane na wzór działania systemu odpowiedzi immunologicznej.

Wśród zestawu technik predestynowanych do sterowania autonomicznymi pojazdami typu AGV w literaturze naukowej znaleźć można także próby zaimplementowania logiki rozmytej [9]. Logika rozmyta jest formą wielowartościowego systemu wnioskowania, który swe początki wywodzi z teorii zbiorów rozmytych. Zmienne w logice rozmytej mogą mieć przypisaną wartość w przedziale od 0 do 1 (Rys. 14). Proces sterowania wykorzystujący teorię zbiorów rozmytych (dla pojazdów AGV lub innych urządzeń) stanowi ważne uzupełnienie istniejących metod i narzędzi do syntezy nieliniowych układów autonomicznych.



Rys. 14. Algorytm działania systemu wnioskowania rozmytego

Głównymi zaletami systemów sterowania z wnioskowaniem rozmytym są możliwości uzyskania prostego i niezależnego systemu sterowania odpornego na zakłócenia w szerokim zakresie parametrów. Dodatkowo system sterowania z wbudowaną logiką rozmytą nie jest wrażliwy na niedokładności i uproszczenia przyjętego modelu układu sterowania.

Podsumowanie i wnioski końcowe

W artykule zostały przedstawione najważniejsze kwestie związane z problemem nawigowania naziemnymi autonomicznymi pojazdami AGV. W celu głębszej analizy problemu przeprowadzono zarówno analizę ilościową i jakościową dla opisanych cech i ograniczeń występujących w pojazdach typu AGV.

W pełni funkcjonalny system nawigacji pełni strategiczną rolę w projektowaniu i sterowaniu pojazdami typu AGV/ UTD. W ramach pracy system nawigacji został zdekomponowany i podzielony na cztery kategorie główne (Rys. 1). Z pośród wyselekcjonowanych kategorii nie wyłoniono kategorii głównej, pełniącej nadrzędne zadania względem pozostałych. Zadania związane z lokalizacją środka transportu, planowaniem trajektorii ruchu, mapowaniem przestrzeni roboczej oraz sterowaniem aktywatorów ruchu posiadają takie same wagi. Każda z przedstawionych kategorii została szczegółowo opisana za pomocą krótkiego rysu historycznego, przeglądu literatury i omówienia aktualnych, obecnych i przyszłych trendów.

Dodatkowo po zapoznaniu się z szeregiem publikacji naukowych traktujących o szeroko rozumianej problematyce związanej z nawigacją urządzeń typu AGV, wyodrębniono potencjalne istotne zagadnienia, stanowiące potencjalne możliwe przyszłe kierunki badań:

- Znaczenie pojazdów AGV w portach (dla transportu kontenerowego) jest niepodważalne, a w najbliższym czasie silnie wzrośnie zapotrzebowanie na zautomatyzowane i zrobotyzowane huby przeładunkowe,
- Specjalistyczne pojazdy są drogie w użyciu, zwłaszcza rodzina pojazdów typu ALV (ang. *Automatic Lifting Vehicle*).
- Pojazdy tego typu są przeznaczone głównie to pracy na otwartym terminalu kontenerowym. W obecnej chwili brakuje rozwiązań efektywnego harmonogramowania ich pracy w celu uzyskania lepszego wyniku ekonomicznego, który finalnie obniżyłby koszty ich eksploatacji.
- W przyszłości wzrośnie ranga i znaczenie narzędzi do oszacowania wymaganej (optymalnej) pod względem wielkości oraz realizowanych zadań floty pojazdów typu AGV,
- Nowoczesny system AGV musi być elastyczny. We współczesnych realiach priorytety działań ulegają częstej modyfikacji. Realizacja ruchu po optymalnej trajektorii ruchu, harmonogramowanie pracy, zdolności adaptacyjne, głównie te parametry stanowią o elastyczności całego systemu,
- Dalsze doskonalenie systemu nawigacyjnego dedykowanych dla pojazdów AGV jest jednym z kluczowych wymagań dla poprawnego i właściwego działania efektywnego systemu transportowego,
- Stałe podnoszenie efektywności transportowej zarówno w odniesieniu do pojedynczych pojazdów AGV jak i całych ich zespołów oraz flot powinno stanowić priorytet wszelkich podjętych działań,
- Opracowanie lub/ i implementowanie narzędzi sztucznej inteligencji opartych o algorytmy działania roju (ang. *Swarm Intelligence*) w chwili obecnej wydaje się być niewystarczające.

Bibliografia:

1. Szpytko J., Kocerba A.: Wybrane aspekty bezpieczeństwa i niezawodności rozproszonych środków transportu. Kraków-Radom, 2008. ISBN 978-83-7204-679-6
2. Szpytko J.: Kształtowanie procesu eksploatacji środków transportu bliskiego. Kraków-Radom, 2004. ISBN 83-7204-370-1
3. Szpytko J., Kocerba A.: Telematics in transportation of dangerous cargo. Journal of KONBiN, Vol. 1, No. 1, pp.205-216, Warsaw, 2006.
4. Wydro K.: Analiza stanu i potrzeb prac rozwojowych w zakresie telematyki transportu w Polsce. Instytut Łączności, Prace Zespołu Międzyzakładowego, Warszawa, 2002.
5. John J., Wprowadzenie do robotyki, Warszawa, WNT, 1993.
6. Farahani Z.F., Laporte G., Miandoabchi E., Bina S., Designing efficient methods for the tandem AGV network design problem using tabu search and genetic algorithm. Int J Adv Manuf Technol. Vol. 36, pp.996–1009, 2008.
7. Garulli A., Giannitrapani A., Rossi A., Vicino A., Mobile Robot SLAM for Line-Based Environment Representation. IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 2, pp.2041-2046, 2005.
8. Podsędkowski L., Dynamiczne planowanie trajektorii robotów mobilnych w zmiennej przestrzeni roboczej. Politechnika Łódzka, Łódź, 1999.
9. Giergiel J., Hendzel Z., Jagielowicz C., Rozmyta realizacja odpornego sterowania ruchem mobilnego robota kołowego. Przegląd Mechaniczny, Zeszyt 9, str. 20-24, 2005.
10. Smoczek J., Szpytko J., Conventional and fuzzy control of an overhead traveling cranes. CARS & FOF 2008, 24th ISPE international conference on CAD/CAM robotics & factories of the future, Koriyama, Japan 29–31 July 2008.
11. Smoczek J., Szpytko J., Fuzzy logic and neural network approach to identification and adaptive control of an overhead traveling crane. Logistyka, Nr 6, str. 1-12, 2009.
12. Smoczek J., Szpytko J., Zastosowanie algorytmów heurystycznych w systemach sterowania ruchem suwnic. Zeszyty Naukowe, Nr 12, str. 145–146, Politechnika Świętokrzyska, 2009.
13. Bruce G., Raghavan S., Wasil E., The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges. Springer, 2008.
14. Smoczek J., Szpytko J., Pole placement approach to discrete and neuro-fuzzy crane control system prototyping. Journal of KONES: Powertrain and Transport, Vol. 16, No. 4 pp.435–445, 2009.
15. Huang Y., Liang Ch., Yang Y., The optimum route problem by genetic algorithm for loading/unloading of yard crane. Computers & Industrial Engineering, Vol. 56, pp.993-1001, 2009.
16. Nowakowski J., Algorytmy sterowania robotem mobilnym w otoczeniu ruchomych przeszkód. Tom 11, Zeszyt 3, str. 223-232, 2007.
17. Glover F., Laguna M., Tabu search. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997. ISBN 0-7923-8187-4
18. Yahja A., Framed-Quadtree Path Planning for Mobile Robots Operating in Sparse Environments. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, pp.650-655, Belgium, 1998.
19. Kułakowski K., Wąs J., Szpyrka M., Dynamiczny model świata w sterowaniu autonomicznym robotem mobilnym. Automatyka, Tom 12, Zeszyt 3, s.833-840, 2008.
20. Pfister S.T., Roumeliotis S.I., Burdick J.W., Weighted Line Fitting Algorithms for Mobile Robot Map Building and Efficient Data Representation. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1304-1311, Taipei, Taiwan, September 14-19, 2003.
21. Newman P.M., Durrant-Whyte H.F., A New Solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. IEEE Transactions on robotics and automation, Vol. 17, No. 3, pp.229-241, 2001.
22. Hyla P.: Automated Guided Vehicles – The survey. Journal of KONES, Vol. 24, No.3, pp.101-110, 2017. ISSN 1231-4005
23. Szpytko J., Hyla P., Stereovision 3D type workspace mapping system architecture for transport devices. Journal of KONES, Vol. 17, No 4, pp.495-504, 2010.
24. Nishi T., Morinaka S., Konishib M., A distributed routing method for AGVs under motion delay disturbance. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 23, pp.517-532, 2007.

25. Qiu L., Hsu W.J, Huang S.Y., Wang H., Scheduling and routing algorithms for AGVs: a survey. *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 40, No. 3, pp.745–760, 2002.
26. Szpytko J., Hyla P., Wybrane metody sterowania pojazdami automatycznymi w terminalach kontenerowych. Nr 4, s. 1-7, 2010. ISSN 1231-54782010
27. Ulatowski W., Sterowanie ruchem automatycznie sterowanych pojazdów. *Pomiary Automatyka Robotyka*, Nr 1, s.18-21, 2004.
28. Latombe J.C. (ed), *Robot Motion Planning and Control*. Springer, 1998.
29. Solimanpur M., Vrat P., Shankar R., An ant algorithm for the single row layout problem in flexible manufacturing systems. *Computers & Operations Research*, Vol. 32, pp.583-598, 2005.
30. Young-Jin L., Jin-Ho S., Jin-Woo L., Kwon-Soon L.: AGV Steering Controller using NN Identifier and Cell Mediated Immune Algorithm. *Proceeding of the 2004 American Control Conference*, Boston, Massachusetts June 30 - July 2, 2004.

AGV autonomous transport units in technological transport

The article discusses a number of aspects related to the application of surface autonomous technological transport vehicles. The attention of the authors is mainly focused on issues related to the location of the technological means of transport in the working space, planning the traffic trajectory for the implementation of the transport task, technical possibilities in mapping the

working space and intelligent method of control of AGV vehicles focused on efficiency. The article synthetically collects key information on key aspects related to the efficient management of both individual AGVs and their entire teams.

Keywords: AGV, technological transport, transport efficiency

Autorzy:

Dr inż. **Paweł Hyla** – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, hyla@agh.edu.pl; autor korespondencyjny

Prof. dr hab. inż. **Janusz Szpytko** - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Dr inż. **Rafał Rumin** – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Zarządzania, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Dr hab. inż. **Jacek Cieśliak**, prof. AGH - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Mgr inż. **Jędrzej Blaut** - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Aleja Mickiewicza 30, 30-059 Kraków