

Grzegorz Bocewicz*, Wojciech Muszyński**, Zbigniew Banaszak***

Deklaratywny model wielorobotowego systemu inspekcji pomieszczeń zamkniętych

1. Wprowadzenie

Mimo że problematyce wykorzystania zespołu mobilnych robotów inspekcyjnych w zadaniach związanych z ochroną budynków i/lub terenów otwartych poświęcono już dziesiątki prac [1, 2, 4, 13, 14], ciągle jeszcze wiele problemów pozostaje otwartych. Wciąż pojawiają się również problemy nowe. W chwili obecnej, z uwagi na rosnące zagrożenie terrorystyczne [9, 10] oraz braki wykwalifikowanych służb pełniących funkcje strażniczo-ochroniarskie, problematyka projektowania i obsługi systemów wielorobotowych nabiera szczególnie istotnego znaczenia (np. metodyka budowy złożonych systemów wielorobotowych obejmujących grupy współpracujących, autonomicznych robotów mobilnych). Poszukiwane metodyki obejmują zazwyczaj dedykowane zadania związane np. z poszukiwaniem osób (np. ofiar wypadków) i/lub przedmiotów (np. ładunków wybuchowych) w budynkach. Przykładowo, mogą dotyczyć rozlokowania pewnej liczby autonomicznych mobilnych robotów inspekcyjnych w środowisku pomieszczeń zamkniętych (np. budynku wielokondygnacyjnym), w taki sposób, by ich percepcja pokrywała możliwie największy obszar. Dobór ilości, typów i sposobu rozlokowania robotów o ograniczonym zasięgu działania, wyposażonych w układy sensoryczne (np. mikrofony), winien gwarantować odnalezienie, w chronionym budynku, obiektów o określonych cechach (np. wykrycie obecności ludzi) i/lub ich ewakuację.

Poszukiwanie tego typu metodyk wiąże się z potrzebą opracowania efektywnych procedur dedykowanych do typowych problemów szczegółowych. Jednym z tego typu problemów jest wspomniany wyżej problem przydziału zadań dla robotów. W pracy przyjmuje się, że dane są: grupa robotów mobilnych oraz lista zadań do zrealizowania, z których każde skojarzone jest z określoną lokalizacją robotów w środowisku. Celem jest wyznaczenie optymalnego przydziału poszczególnych robotów do zadań tak, aby sumaryczny czas ich

* Politechnika Koszalińska, Katedra Podstaw Informatyki i Zarządzania

** Politechnika Wroclawska, Instytut Informatyki, Automatyki i Robotyki

*** Politechnika Warszawska, Zakład Informatyki Gospodarczej

wykonania był minimalny. Inny tego typu problem wiąże się z planowaniem (wyznaczeniem) i pokonaniem tras (związanych np. z koniecznością przeszukanie terenu) przez roboty, tak by minimalizować czas, dystans czy też ilość potrzebnej energii. Uszczegółowienie takiego problemu dotyczy zwykle rozpoznania środowiska, przeszukania środowiska i/lub wyszukania w nim zadanego obiektu.

Typowe, najczęściej wykorzystywane do rozwiązania tego typu problemów podejście wykorzystuje zalety metody sztucznych pól potencjałowych uwzględniających odległość (przyciąganie) do celu oraz omijanie (odpychanie od) przeszkód [13]. Wśród innych podejść warto wyróżnić metody implementujące paradygmaty podejścia celowego lub reaktywnego (behawioralnego) oraz ich hybrydy [3, 5, 6, 7, 11, 12]. Przyjmuje się, że poszukiwane rozwiązania winna charakteryzować:

- skalowalność – gwarantująca możliwość zwiększania liczby robotów i/lub poszerzanie środowiska ich działania (innymi słowy: możliwość zwiększania stosowanej liczby robotów oraz zdolność do przetwarzania coraz większej ilości zadań w jednostce czasu);
- rozszerzalność – gwarantująca możliwość dodawania zadań realizowanych przez roboty, dodawania nowych typów robotów, a także rozbudowy środowiska działania robotów oraz modyfikacji lub zmiany stosowanych algorytmów planowania tras i koordynacji ruchu;
- odporność na awarie – umożliwiająca kontynuację zadania w sytuacji awarii jednego lub kilku robotów z zespołu.

Proponowane w pracy podejście do rozważanego problemu doboru, alokacji i planowania działań grupy robotów mobilnych zakłada deklaratywny model środowiska pomieszczeń zamkniętych.

Rozdział 2 przedstawia sformułowanie problemu alokacji i planowania działań mobilnych robotów inspekcyjnych. W rozdziale 3 przedstawiono model referencyjny deklaratywnego modelu przeszukiwanego środowiska. Rozdział 4 przedstawia przykład ilustrujący zastosowanie zaproponowanego modelu w zadaniach wariantowania struktury wieloobrotowego systemu inspekcyjnego. Niektóre z perspektywicznych kierunków badań stanowiących kontynuację wyników przedstawionych w pracy przedstawiono w rozdziale 5.

2. Sformułowanie problemu

Dany jest zespół robotów P o znanych parametrach (np. scharakteryzowanych przez: wymiary geometryczne, prędkość przemieszczania się itp.), znana jest przestrzeń przeszukiwania S (przyjmuje się, że obszar podlegający inspekcji specyfikują: kształt i rozmiar).

W przestrzeni S rozmieszczone są przeszkody O (scharakteryzowane przez parametry determinujące ich kształt, rozmiar i położenie) które ograniczają zasięg widzenia robotów. Zakłada się, że część przeszkód jest ruchomych, przy czym znane są ich trajektorie ruchu.

Przyjmijmy, że rozważany problem sprowadza się do odpowiedzi na pytanie, czy w danym pomieszczeniu oprócz znanych przedmiotów (przeszkód) znajdują się jeszcze jakieś inne obiekty? Problem ten można również sformułować w jednej z niżej podanych postaci szczegółowych: Czy dane rozmieszczenie początkowe robotów, o znanych parametrach gwarantuje przeszukanie całej przestrzeni \mathcal{S} w zadanym horyzoncie czasu t_H ? Ile robotów, gdzie rozmieszczonych i o jakich parametrach gwarantuje przeszukanie całej przestrzeni \mathcal{S} w zadanym horyzoncie czasu t_H ? Oba rodzaje sformułowań odpowiednio problemu wprost i problemu wstecz łączy jedno, wspólne dla obu z nich pytanie: *Czy istnieją takie trajektorie ruchu poszczególnych robotów, które gwarantują przeszukanie całej przestrzeni \mathcal{S} w zadanym horyzoncie czasu t_H ?*

Przez przeszukanie przestrzeni \mathcal{S} rozumiane jest takie przemieszczanie robotów, które pozwala na eksplorację całej przestrzeni \mathcal{S} (tzn. obszaru wolnego od przeszkód). Na rysunku 1 przedstawiono przykład dwuwymiarowej przestrzeni \mathcal{S} (przestrzeń tę przedstawia widok z góry obszaru podlegającego inspekcji), z jednym robotem P_1 (o kształcie kwadratu) oraz trzema przeszkodami (O_1, O_2, O_3). Przeszkody O_1 i O_2 są przeszkodami ruchomymi. Przeszkoda O_1 przemieszcza się po trajektorii poziomej, ze stałą prędkością, cyklicznie od lewej (oznaczonej symbolem „[„) do prawej (oznaczonej przez „]”) granicy ruchu. Analogicznie odbywa się ruch przeszkody O_3 (ruch po trajektorii pionowej). Kolorem jasno szarym oznaczony został obszar niewidoczny dla robota dla wybranych pozycji początkowych przeszkód O_1, O_3 .

3. Model deklaratywny

W przyjętym modelu zakłada się, że zarówno przestrzeń \mathcal{S} , zespół robotów \mathbf{P} , jak i przeszkody \mathbf{O} reprezentowane są przez obiekty dwuwymiarowe (wielokąt prosty). Formalnie wielkości te definiowane są następująco:

- \mathcal{S} – przestrzeń przeszukiwania reprezentowana przez wielokąt prosty postaci:

$$\mathcal{S} = (s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (1)$$

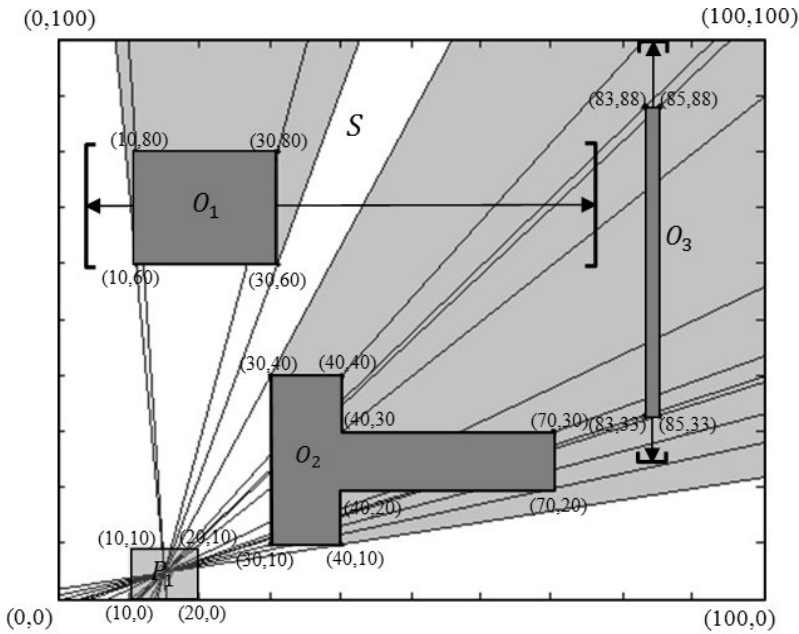
gdzie: $s_i = (sx_i, sy_i)$ – i -ty wierzchołek wielokąta o współrzędnych sx_i, sy_i (współrzędne wyrażane są w układzie kartezjańskim): $(sx_i, sy_i) \in \mathbf{R}^2$.

- \mathbf{P} – zespół robotów:

$$\mathbf{P} = (P_1, P_2, \dots, P_m) \quad (2)$$

gdzie:

- $P_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,l(i)})$ – wielokąt prosty reprezentujący i -ty robot inspekcyjny,
- $p_{i,j}$ – wierzchołek wielokąta P_i o współrzędnych $(px_{i,j}, py_{i,j}) \in \mathbf{R}^2$,
- $l(i)$ – liczba wierzchołków wielokąta P_i ,
- m – liczba robotów inspekcyjnych.



Legenda:

- (vx_1, vy_1) (vx_2, vy_2)
 (vx_3, vy_3) (vx_3, vy_3)
 (vx_4, vy_4) (vx_3, vy_3)
 P_1 - robot inspekcyjny P_1 o współrzędnych wierzchołków: (vx_1, vy_1) , (vx_2, vy_2) ,
 (vx_3, vy_3) , (vx_3, vy_3)
 (vx_1, vy_1) (vx_2, vy_2)
 (vx_3, vy_3) (vx_3, vy_3)
 (vx_4, vy_4) (vx_3, vy_3)
 O_i - i -ta przeszkoda o współrzędnych wierzchołków: (vx_1, vy_1) , (vx_2, vy_2) ,
 (vx_3, vy_3) , (vx_3, vy_3)
 - obszar niewidoczny dla robota, $\left[\longleftrightarrow \right]$ - trajektoria ruchomej przeszkody

Rys. 1. Przestrzeń S z jednym robotem i trzema przeszkodami

– O – sekwencja przeszkód:

$$O = (O_1, O_2, \dots, O_k) \quad (3)$$

gdzie:

$O_i = (o_{i,1}, o_{i,2}, \dots, o_{i,lo(i)})$ – wielokąt prosty reprezentujący i -tą przeszkodę,

$o_{i,j}$ – wierzchołek przeszkody O_i o współrzędnych $(ox_{i,j}, oy_{i,j}) \in \mathbf{R}^2$,

$lo(i)$ – liczba wierzchołków przeszkody O_i ,

k – liczba przeszkód.

Zakłada się, że przeszkody \mathbf{O} leżą wewnątrz przestrzeni \mathcal{S} , związek ten opisuje ograniczenie:

$$S \cap O_i = O_i \quad \forall i \in \{1, \dots, k\} \quad (4)$$

gdzie: $A \cap B$ – część wspólna obszarów ograniczonych wielokątami A, B .

Dla robotów inspekcyjnych \mathbf{P} definiowane są ponadto:

- $w(P_i)$ – zasięg widzenia i -tego robota reprezentowany jest przez dowolny wielokąt wyznaczany, jako:

$$w(P_i) = S \setminus b(P_i) \quad (5)$$

gdzie:

$b(P_i)$ – dowolny wielokąt reprezentujący obszar niewidoczny dla i -tego robota (obszar oznaczony na rys. 1 kolorem szarym),

$A \setminus B$ – różnica zbiorów A, B ; przez zbiory A, B rozumie się zbiory punktów przestrzeni ograniczonej wielokątami A, B .

Na rysunku 1 obszar oznaczony białym kolorem (tło przestrzeni \mathcal{S}) jest traktowany jako zasięg widzenia robota \mathbf{P}_1 .

- $W(P)$ – zasięg widzenia zespołu robotów:

$$W(P) = \bigcup_{i=1}^m w(P_i) \quad (6)$$

gdzie: $\bigcup_{i=1}^k A_i = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_k$,

- T_i – trajektoria robota P_i , stanowiąca sekwencję kolejnych pozycji robota P_i :

$$T_i = (P_i^1, P_i^2, \dots, P_i^q) \quad (7)$$

gdzie:

P_i^j – wielokąt prosty reprezentujący położenie i -tego robota w j -tym kroku, zakłada się, że położenie początkowe określone jest przez $P_i, P_i^1 = P_i$,

q – długość trajektorii T_i , (zakłada się, że każda trajektoria ma tę samą długość, tzn. każdy robot realizuje tę samą liczbę kroków).

- $t(T_i)$ – czas przebycia trajektorii T_i , wyznaczany z zależności:

$$t(T_i) = \sum_{j=1}^{q-1} \Delta t(P_i^j, P_i^{j+1}) \quad (8)$$

gdzie: $\Delta t(P_i^j, P_i^{j+1})$ – czas przemieszczenia się i -tego robota między kolejnymi pozycjami P_i^j, P_i^{j+1} .

W rozważanym przypadku przyjęto, że czas przemieszczania jest stały w każdym kroku i niezależny od rodzaju robota: $\Delta t(P_i^j, P_i^{j+1}) = \Delta t$, stąd:

$$t(T_i) = (q-1) \cdot \Delta t, \quad \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (9)$$

Wśród przeszkód \mathbf{O} wyróżnia się przeszkody ruchome, którym podobnie jak robotom przyporządkowane są trajektorie ruchu. Oznacza to, że sekwencja \mathbf{O} określa początkowe współrzędne przeszkód. Współrzędne przeszkód w j -tym kroku określane są przez:

$$O^j = (O_1^j, O_2^j, \dots, O_k^j) \quad (10)$$

gdzie: O_i^j – wielokąt prosty reprezentujący położenie i -tej przeszkody w j -tym kroku.

Zakłada się, że $O^1 = O$, a każda kolejna sekwencja O^{j+1} składa się z elementów (11):

$$O_i^{j+1} = r(O_i^j), \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, k \quad (11)$$

gdzie: $r(O_i^j)$ – funkcja określając położenie i -tej przeszkody w kroku $j+1$. W przypadku przeszkód nieruchomych $r(O_i^j) = O_i^j$ dla dowolnego j .

$S^* \subset S$ oznacza podprzestrzeń zakrytą przez przeszkody. W przypadku przeszkód ruchomych do tej przestrzeni należą również obszary dotychczas zakryte przez przeszkody.

Sformułowanie problemu:

Dane są: S, P, O, r . Czy istnieje zbiór trajektorii $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, spełniający ograniczenia:

$$t(T_i) \leq t_H, \quad \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (12)$$

$$\bigcup_{i=1}^m \bigcup_{j=1}^q w(P_i^j) = S \setminus S^* \quad (13)$$

$$S \cap P_i^j = P_i^j, \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, q\} \quad (14)$$

$$\left(\bigcup_{l=1}^k O_l^j \right) \cap P_i^j = \emptyset, \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, q\} \quad (15)$$

$$P_a^i \cap P_b^i, \quad a \neq b, \quad \forall a, b \in \{1, \dots, m\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, q\} \quad (16)$$

Czas ukończenia przebycia trajektorii każdego robota ograniczony jest przez wartość zadanego horyzontu czasu t_H (12). Przestrzeń S (z wykluczeniem obszarów S^* zajętych

przez przeszkody O), winna być w zasięgu widzenia zespołu robotów przemieszczających się wzdłuż trajektorii T (13). Roboty i przeszkody mobilne nie mogą: opuszczać obszaru określony przestrzenią S (14), zajmować wspólnego obszaru z przeszkodami O (15) oraz z innymi robotami (16).

4. Wariantowanie struktury wielorobotowego systemu inspekcyjnego

Przedstawiona ilustracja wariantowania struktury wielorobotowego systemu inspekcyjnego odpowiadają pierwszemu z wcześniej przedstawionych sformułowań problemu planowania działań grupy robotów w środowisku z ruchomymi przeszkodami – problemowi wprost. Dana jest przestrzeń przeszukiwania S jak na rysunku 1:

$$S = ((0, 0), (0, 100), (100, 100), (100, 0)).$$

W przestrzeni rozmieszczone są trzy przeszkody O_1, O_2, O_3 o współrzędnych początkowych wierzchołków:

$$O_1 = ((10, 10), (30, 40), (40, 40), (40, 30), (70, 30), (70, 20), (40, 20), (40, 10)),$$

$$O_2 = ((10, 60), (10, 80), (30, 80), (30, 60)),$$

$$O_3 = ((83, 33), (83, 88), (85, 88), (85, 33)).$$

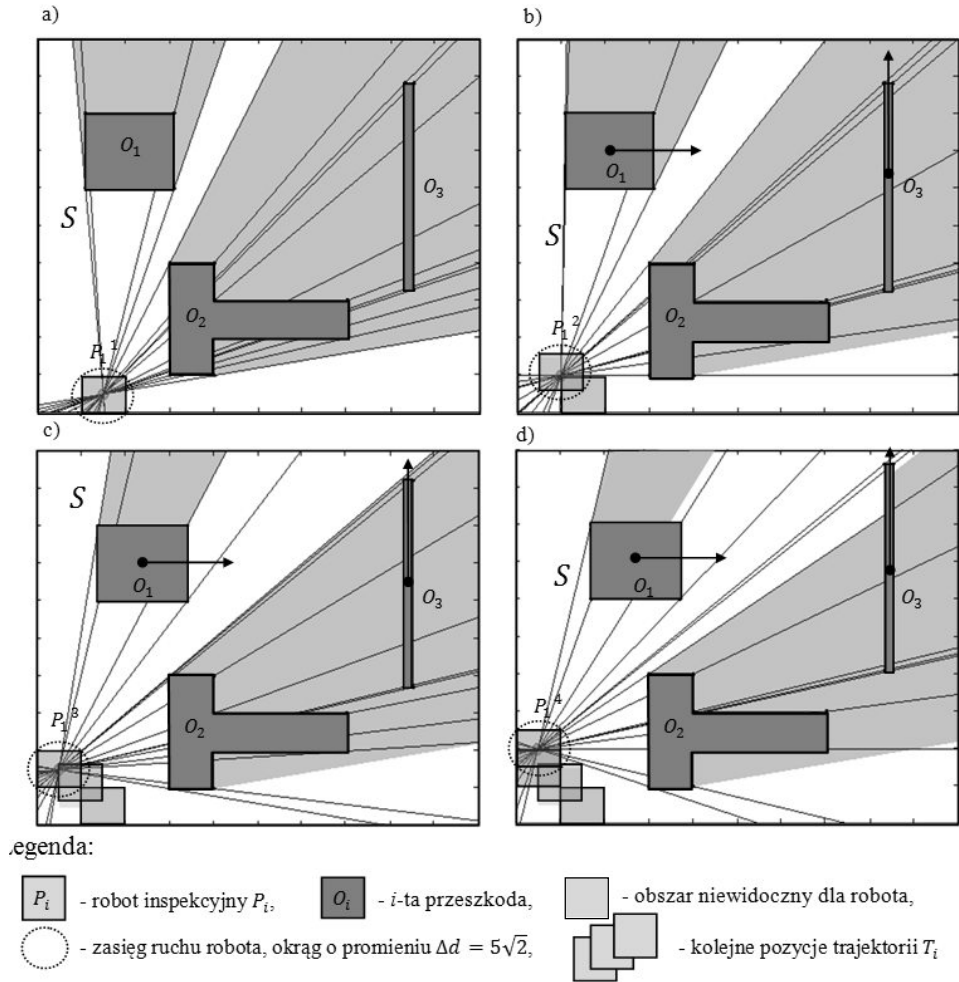
Przeszkody O_1, O_2 przemieszczają się zgodnie z trajektoriami przedstawionymi na rysunku 1. Prędkość przemieszczania jest stała, każda przeszkoda w jednym kroku przebywa odległość: $\Delta d = 4$.

Dany jest robot inspekcyjny P_1 o kształcie kwadratu (wymiary 10×10). Przyjmuje się, że robot w jednym kroku może przebyć odległość nie większą niż: $\Delta d = 5\sqrt{2}$ (co odpowiada połowie przekątnej kwadratu reprezentującego robot), natomiast czas przemieszczania robota w ramach jednego kroku wynosi $\Delta t = 1$ u.j.c. (umownych jednostek czasu).

Znane jest położenie robota mobilnego w pomieszczeniu. Poszukiwana jest odpowiedź na pytanie: Czy startując z zadanej pozycji początkowej P_1 istnieje trajektoria T_1 robota, która pozwoli na przeszukanie całej przestrzeni S w czasie nieprzekraczającym $t_H = 35$ u.j.c.?

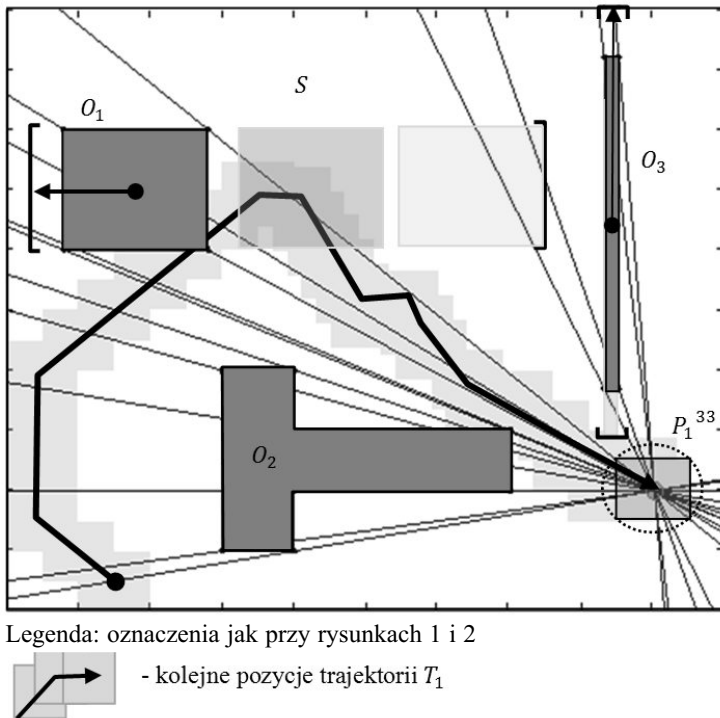
Do udzielenia odpowiedzi na postawione pytanie wykorzystano zaproponowany w [8] algorytm **FeasiblePositions** (problem jest implementowany jako Problem Spełniania Ograniczeń PSO). Zastosowany algorytm należy do klasy algorytmów zachłanych, bez możliwości nawrotów. Algorytm pozwala uzyskać rozwiązanie w dość krótkim czasie (dla rozważanej skali czas odpowiedzi nie przekracza 100 s. – Intel Core 2 Duo 3 GHz, 2 GB RAM) jednak nie gwarantuje bezblokadowej realizacji ruchu robotów tzn. nie w każdym przypadku ograniczenie (15) jest spełnione.

Na rysunku 2 przedstawiono pierwsze 4 pozycje otrzymane, jako wynik kolejnych iteracji algorytmu. Na każdym rysunku okręgiem oznaczono zasięg ruchu robota. Kolejna pozycja wyznaczana jest w obszarze ograniczonym tym okręgiem w sposób gwarantujący zwiększenie zasięgu widzenia robota.



Rys. 2. Pozycje robota inspekcyjnego otrzymywane z algorytm

Rysunek 3 przedstawia całą trajektorię T_1 robota aż do momentu osiągnięcia pozycji P_1^{33} , z której nie można już zwiększyć obszaru widzenia robota (warunek stopu algorytmu). Trajektorja zawiera 33 pozycje, w ramach których możliwe jest przeszukanie całej przestrzeni S , co oznacza, że odpowiedź na zadane pytanie jest pozytywna. Wyznaczona trajektorja umożliwia przeszukanie całej przestrzeni S w czasie nieprzekraczającym $t_H = 35$ u.j.c.



Rys. 3. Trajektoria robota inspekcyjnego otrzymana jako wynik algorytmu **FeasiblePositions**

5. Zakończenie

Przedstawione rozwiązanie wpisuje się w oczekiwania związane z poszukiwaniem metodyki wariantowania złożonych systemów wieloobrotowych systemów obejmujących grupy współpracujących, autonomicznych robotów mobilnych. Oczekiwania te związane ze skalowalnością, rozszerzalnością i odpornością algorytmów koordynacji działań grupy robotów mobilnych gwarantowane są poprzez strukturę problemu PSO, tzn. zbiór zmiennych, dziedzin ich zmienności oraz zbiór ograniczeń. Naturalną zaletą proponowanego deklaratywnego ujęcia, również wynikającą ze struktury PSO, jest możliwość formułowania różnych pytań (problemów typu wprost i wstecz) jak i implementowania strategii poszukiwania rozwiązań, strategii uwzględniających specyfikę rozważanej klasy zagadnień.

Przedstawione w pracy badania będą kontynuowane w zakresie modelowania przemieszczania się w formacjach (np. robot rozpoznawczy poprzedza robota ewakuacyjnego) oraz w sytuacjach, w których roboty wykrywają swoją wzajemną obecność, a także muszą podejmować decyzje unikające wzajemnych zakleszczeń.

Literatura

- [1] Będkowski J., Masłowski A., *Cognitive Theory – Based Approach for Inspection using Multi Mobile Robot Control*. The 7th IARP International WS HUDEM'2008, AUC, Cairo, 2008.
- [2] Będkowski J., Kowalski G., Masłowski A., *Wielorobotowy mobilny system inspekcyjno-interwencyjny*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika, z. 166, t. 2, 2008, 695–702.
- [3] Będkowski J., Kowalski P., Masłowski A., *Inteligencja obliczeniowa w zastosowaniu do kognitywnego nadzorowania systemu wielu robotów pracujących w sieci*. XIII Konferencja Naukowo-Techniczna Automatyka – Nowości i Perspektywy, Warszawa, 312–321.
- [4] Bocewicz G., Banaszak Z., *Deklaratywny model mobilnego systemu inspekcyjnego*. Pomiary Automatyka Robotyka, PAR, nr 2/2011, 420–430.
- [5] Bocewicz G., Bach I., Banaszak Z., *Logic-algebraic method based and constraints programming driven approach to AGVs scheduling*. [w:] International Journal of Intelligent Information and Database Systems, vol. 3, No 1, 2009, 56–74.
- [6] Bocewicz G., Banaszak Z., Wójcik R., *Design of admissible schedules for AGV systems with constraints: a logic-algebraic approach*. [w:] Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, Nguyen N.T., Grzech A., et al. (Eds.), Lecture Notes in Artificial Intelligence 4496, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007, 578–587.
- [7] Bocewicz G., Banaszak Z., *Cyclic processes scheduling*. [w:] Applied Computer Science: Production engineering IT-driven concepts, Bzdrya K., Mleczek J. (Eds.), vol. 6, No. 2, 2010, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 41–70.
- [8] Bocewicz G., Bzdrya K., Banaszak Z., *Wariantowanie struktury wieloobrotowych systemów inspekcyjnych*. W: Inżynieria Produkcji, Bieslko Biała, 2010 (w druku).
- [9] Borodzicz E.P., *Risk, Crisis and Security Management*. West Sussex, England, John Wiley and Sons Ltd., 2005, 256 p.
- [10] Nowak E., *Zarządzanie kryzysowe w sytuacjach zagrożeń niemilitarnych*. AON, Warszawa 2007, 227 p.
- [11] Panfil W., Moczulski M., *System sterowania grupą robotów inspekcyjnych – opis badań wstępnych*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektronika, z. 175, t. 1, 2010, 161–174.
- [12] Skrzypczyński P., *Jednoczesna samolokalizacja i budowa mapy: podejście probabilistyczne*. Problemy robotyki TOM I, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2008, 3–22.
- [13] Trojnacki M., Szykarczyk P., *Tendencje rozwoju mobilnych robotów ładowych (3) Autonomia robotów mobilnych – stan obecny i perspektywy rozwoju*. Pomiary Automatyka Robotyka, PAR, nr 9/2008, 5–9.
- [14] Turek W., *Agentowy system wieloobrotowy do zarządzania grupą robotów mobilnych*. Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH, Kraków 2009, praca doktorska.