

Witold KRUCZEK, Krzysztof CYRAN  
Instytut Informatyki Politechniki Śląskiej

## **METODY WYZNACZANIA TORU LOTU SAMOLOTU BEZZAŁOGOWEGO WYKONUJĄCEGO ZADANIE KONWOJOWANIA POJAZDÓW**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono dwie metody wyznaczania toru lotu samolotu bezzałogowego przeznaczonego do obserwacji terenu, wykonującego zadanie konwojowania pojazdów – metodę krążenia oraz metodę „ósemkowania”. Przedstawiono wyniki symulacji toru lotu dla wybranych wartości parametrów lotu.

**Słowa kluczowe:** UAV, samolot bezzałogowy, śledzenie celu, konwojowanie

## **METHODS OF FLIGHT PATH PLANNING FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE PERFORMING A TASK OF VEHICLE ESCORTING**

**Summary.** This paper presents two methods of flight path planning for the unmanned aerial vehicle designed to terrain observation, performing a task of vehicles escorting. Flight path simulation results for some flight parameter values are presented.

**Keywords:** UAV, Unmanned Aerial Vehicle, Target Following, Convoy Escorting

### **1. Wprowadzenie**

Samoloty bezzałogowe przeznaczone do obserwacji terenu lub obiektów naziemnych mogą być w szczególności wykorzystane do obserwacji terenu przed poruszającym się pojazdem wzdłuż jego trasy (konwojowanie). W artykule opisano dwa algorytmy automatycznego sterowania torem lotu samolotu bezzałogowego, które mogą być zaimplementowane w jego komputerze pokładowym (autopilocie), określające trasę lotu w taki sposób, aby spełnione były warunki optymalnej obserwacji. Artykuł dotyczy klasy samolotów opisanych w [6].

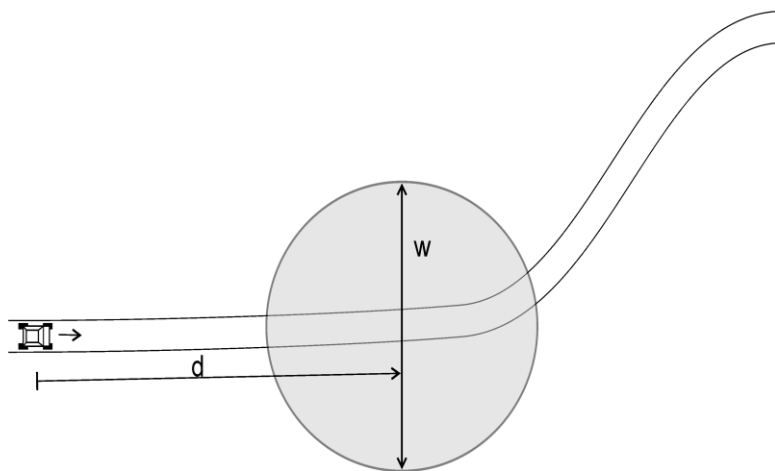
Zadanie konwojowania pojazdów polega na obserwacji z określonym wyprzedzeniem  $d$  (np. 500 m) obszaru po obu stronach trasy, którą porusza się pojazd (rys. 1) przy następujących założeniach:

- brak wcześniejszej znajomości trasy, po której będzie poruszał się konwojowany pojazd,
- znajomość bieżącej pozycji geograficznej pojazdu,
- prędkość pojazdu: od 0 do 25 m/s.

Obserwacja jest prowadzona przy szerokim kącie widzenia kamery. Optymalne warunki obserwacji są spełnione, gdy samolot utrzymuje zadaną odległość wyprzedzenia  $d$  przed konwojowanym pojazdem z możliwie najmniejszymi odchyłkami i odchylenie boczne od trasy ( $w/2$ ) jest jak najmniejsze.

Konwojowanie pojazdów jest możliwe przy użyciu trybu półautomatycznego lub trybu naprowadzania przez kamerę, jest jednak dość trudne ze względu na konieczność zachowania odpowiedniego wyprzedzenia samolotu przed pojazdem, w sytuacji gdy prędkość i kierunek pojazdu mogą się zmieniać w szerokich granicach. Możliwość zmiany prędkości samolotu jest ograniczona. Prędkość samolotu jest z reguły większa od prędkości pojazdu, co przy wymaganiu lotu w stałej odległości przed pojazdem wymusza lot po trasie dłuższej niż trasa pojazdu. W praktyce sterowania ręcznego często dochodzi do sytuacji, gdy samolot zostaje wyprzedzony przez konwojowany pojazd i przez pewien czas teren przed pojazdem nie jest obserwowany.

Opisywane metody automatycznego konwojowania pojazdów zakładają, że konwojowany pojazd ma łączność z samolotem i co określony czas (np. co 1s) wysyła swoje współrzędne geograficzne. Samolot na tej podstawie określa trajektorię lotu, pozostawiając operatorowi możliwość sterowania położeniem kamery. Operator ma możliwość chwilowego przejścia w inny tryb lotu, np. w celu dokładniejszego obejrzenia napotkanego na trasie obiektu.



Rys. 1. Zadanie konwojowania pojazdów  
Fig. 1. The task of escorting vehicles

## 2. Metoda konwojowania poprzez krążenie

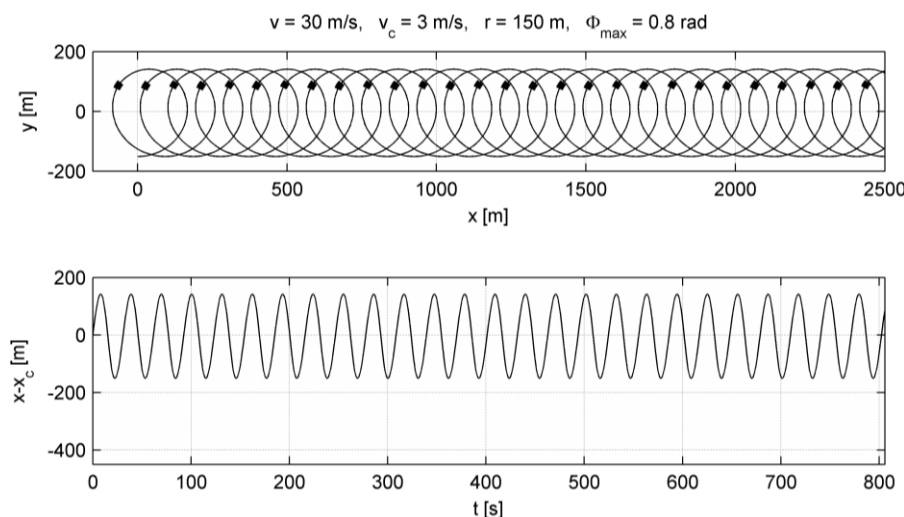
Jedną z najprostszych metod konwojowania, która może być wykorzystana przez samoloty bezzałogowe, jest wykonywanie okręgów o promieniu  $r$  i środku w odległości  $d$  od konwojowanego pojazdu na przedłużeniu jego trasy. Rysunki 2, 3 i 4 przedstawiają tor lotu samolotu lecącego z prędkością  $v$  dla różnych prędkości  $v_c$  konwojowanego pojazdu. Przedstawiono również wykres rzutu odległości samolotu od zakładanego środka krążenia ( $x - x_c$ ) wzdłuż trasy konwoju. Dla uproszczenia założono, że trasa jest prosta i pokrywa się z osią  $X$  układu współrzędnych. Lot odbywa się w warunkach bezwietrznych, a prędkość samolotu jest stała. Pogrubione fragmenty toru lotu oznaczają miejsca, w których samolot osiągnął maksymalne dopuszczalne przechylenie  $\Phi_{max}$  i związany z nim minimalny promień zakrętu, zgodnie z zależnością opisującą równowagę sił w ruchu po okręgu:

$$\frac{mv^2}{r} = mg \tan \Phi \quad (1)$$

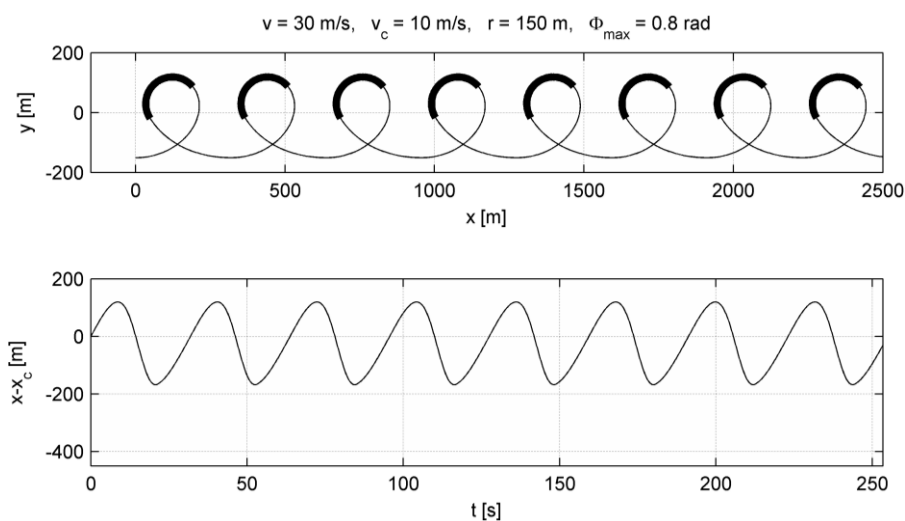
Maksymalne dopuszczalne przechylenie wynika z maksymalnego dopuszczalnego współczynnika przeciążenia  $n$  założonego na etapie projektowania samolotu [5]:

$$n = \frac{1}{\cos \Phi} \quad (2)$$

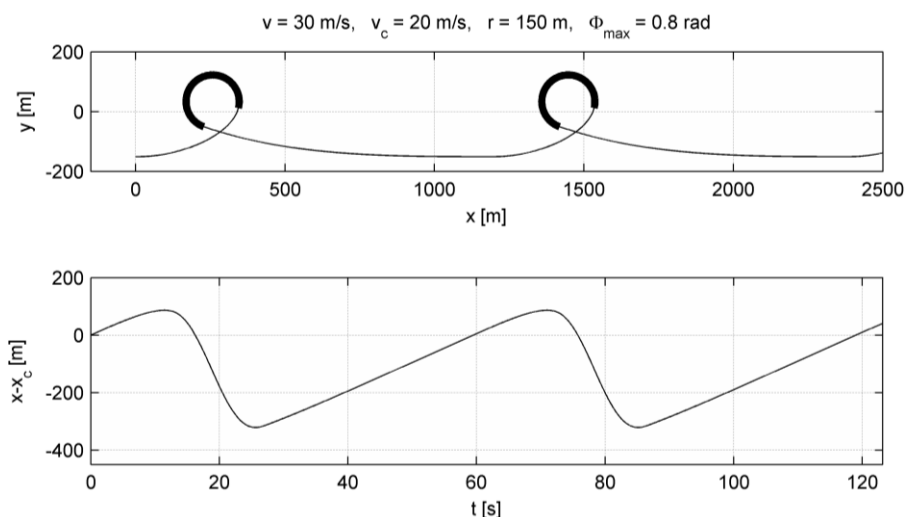
Ostrzejszymi ograniczeniami maksymalnego przechylenia samolotu są trudności w sterowaniu, wynikające z wymaganej większej precyzji zachowania zadanych kątów w locie z dużym przechyleniem oraz ograniczenia dynamiczne układu stabilizacji kamery.



Rys. 2. Krążenie – tor lotu dla małych prędkości konwojowanego pojazdu  
Fig. 2. Circling – flight path for small speed of escorted vehicle



Rys. 3. Krążenie – tor lotu dla średnich prędkości konwojowanego pojazdu  
Fig. 3. Circling – flight path for medium speed of escorted vehicle



Rys. 4. Krążenie – tor lotu dla dużych prędkości konwojowanego pojazdu  
Fig. 4. Circling – flight path for big speed of escorted vehicle

Przyjęto następujący algorytm podążania samolotu za okręgiem o przesuającym się środkiem:

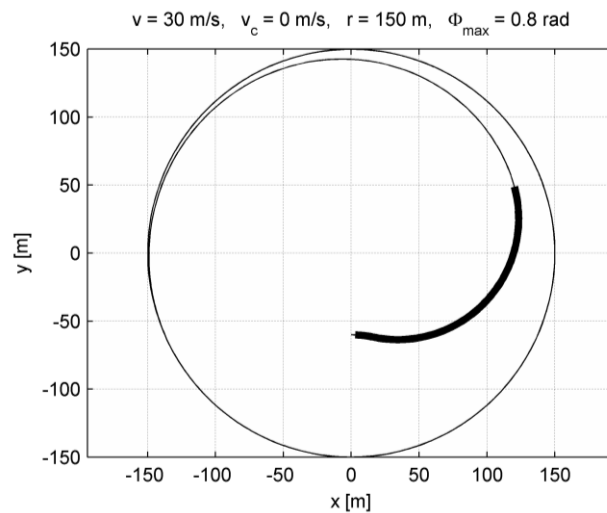
- jeżeli samolot znajduje się na zewnątrz okręgu, to kierowany jest w kierunku stycznej do tego okręgu (z lewej lub prawej strony w zależności od przyjętego kierunku krążenia),
- w przeciwnym wypadku samolot kierowany jest prostopadłe do promienia z poprawką kątową  $p$  odchylającą tor lotu na zewnątrz okręgu (rys. 5):

$$p = \frac{\pi r - a}{2} \frac{c}{r} \quad (3)$$

$r$  – promień okręgu,

$a$  – odległość samolotu od środka okręgu,

$c$  – parametr algorytmu dobierany eksperymentalnie (we wszystkich symulacjach przyjęto  $c = 0.5$ ).



Rys. 5. Tor lotu podczas krążenia rozpoczynającego się wewnątrz okręgu  
Fig. 5. Flight path when circling begins inside the circle

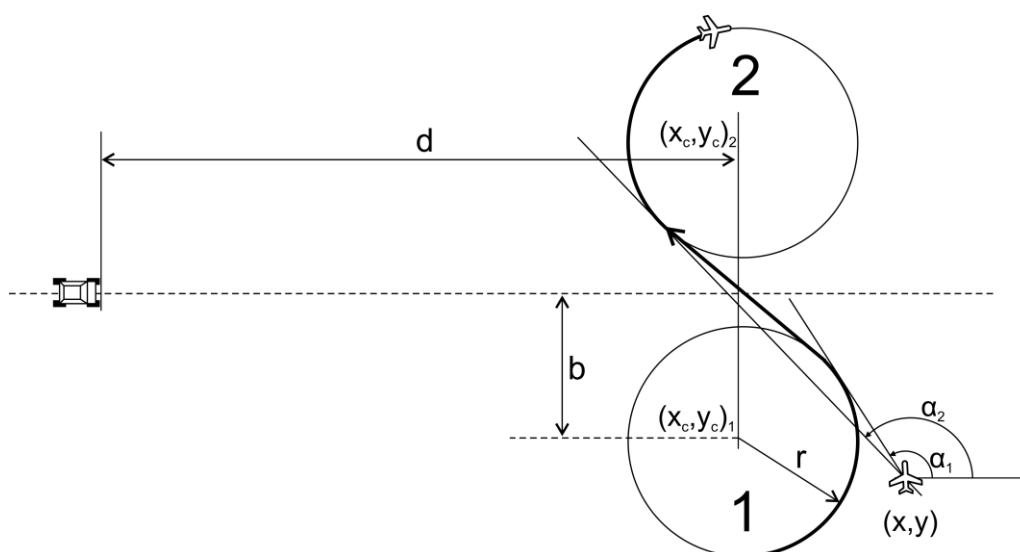
W miarę wzrostu prędkości konwojowanego pojazdu, a tym samym zmniejszania się różnicy prędkości względem samolotu można zauważyć następujące niekorzystne zjawiska:

- Tor lotu staje się niesymetryczny – samolot przez większość czasu znajduje się po jednej stronie trasy, wykonując zakręt o dużym promieniu. Po drugiej stronie trasy samolot znajduje się tylko w krótkich okresach, wykonując szybki zakręt o małym promieniu. Warunki obserwacji terenu są wtedy niekorzystne.
- Po wykonaniu zakrętu odległość od samolotu do zadanego środka okręgu zwiększa się, a tym samym samolot przybliża się do konwojowanego pojazdu, dając operatorowi mało czasu na przeprowadzenie obserwacji i reakcję.

Powyższe wady są charakterystyczne dla małych samolotów bezzałogowych poruszających się ze stosunkowo niewielkimi prędkościami względem konwojowanych pojazdów, pojawiła się więc potrzeba opracowania metod konwojowania bardziej dopasowanych do specyfiki tego rodzaju samolotów.

### 3. Metoda konwojowania poprzez „ósemkowanie”

Głównym powodem opóźnienia samolotu względem zadanego miejsca obserwacji (środek okręgu) w metodzie krążenia jest stosunkowo długi czas lotu w kierunku przeciwnym niż poruszający się konwój. W metodzie „ósemkowania” są wykonywane na przemian zakręty w lewo i w prawo, zawsze w kierunku poruszania się konwoju (rys. 6).

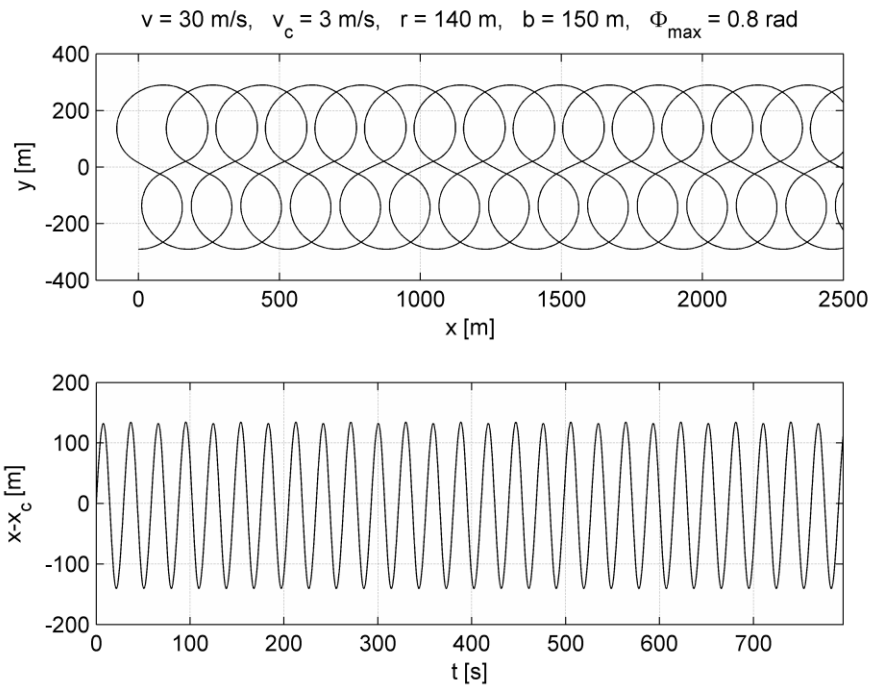


Rys. 6. Metoda „ósemkowania”

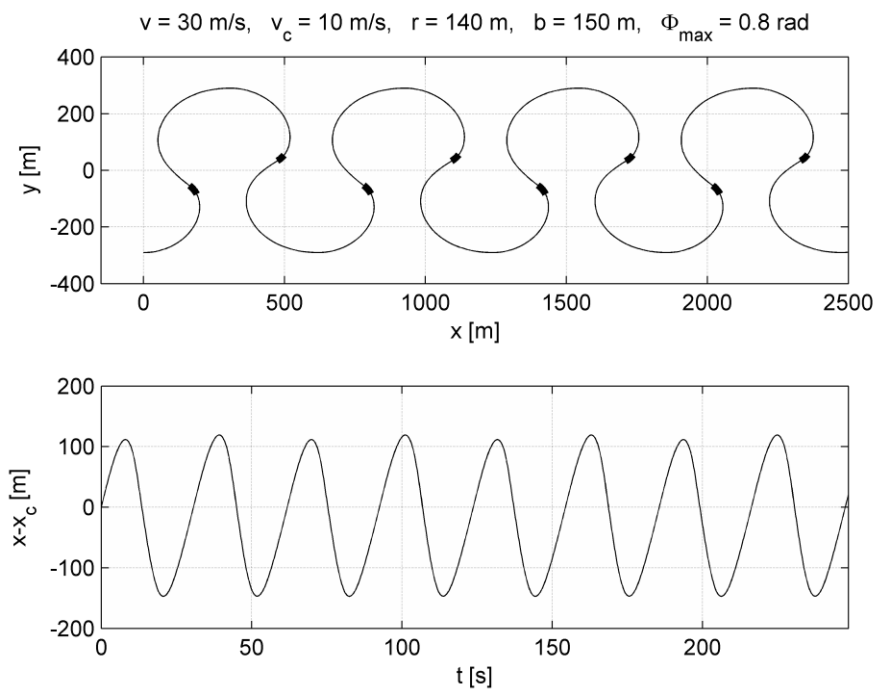
Fig. 6. „Eighting” method

Środki okręgów 1 i 2 są rozmieszczone po prawej i lewej stronie trasy konwoju w odległości  $b$  od osi trasy oraz  $d$  od konwoju (rzut na oś X). Ich współrzędne są na bieżąco aktualizowane na podstawie znajomości aktualnych współrzędnych konwoju. Samolot wykonuje krążenie wokół wybranego, przesuwającego się środka według algorytmu opisanego w metodzie konwojowania poprzez krążenie. Na bieżąco są obliczane kąty drogi od samolotu do stycznych do obydwu okręgów ( $\alpha_1, \alpha_2$ ). Przełączenie pomiędzy okręgami następuje, gdy  $\alpha_1 > \alpha_2$ , niezależnie czy jest to przełączenie z okręgu prawego na lewy, czy odwrotnie. Po przełączeniu jest blokowana możliwość powtórnego przełączenia aż do momentu, gdy kierunek lotu samolotu będzie w przybliżeniu zgodny z kierunkiem poruszania się konwoju. Blokada zapobiega wielokrotnemu, szybkiemu przełączaniu pomiędzy okręgami, wynikającemu z faktu, że ten sam warunek kątowy jest sprawdzany przy każdym przełączeniu, niezależnie od kierunku.

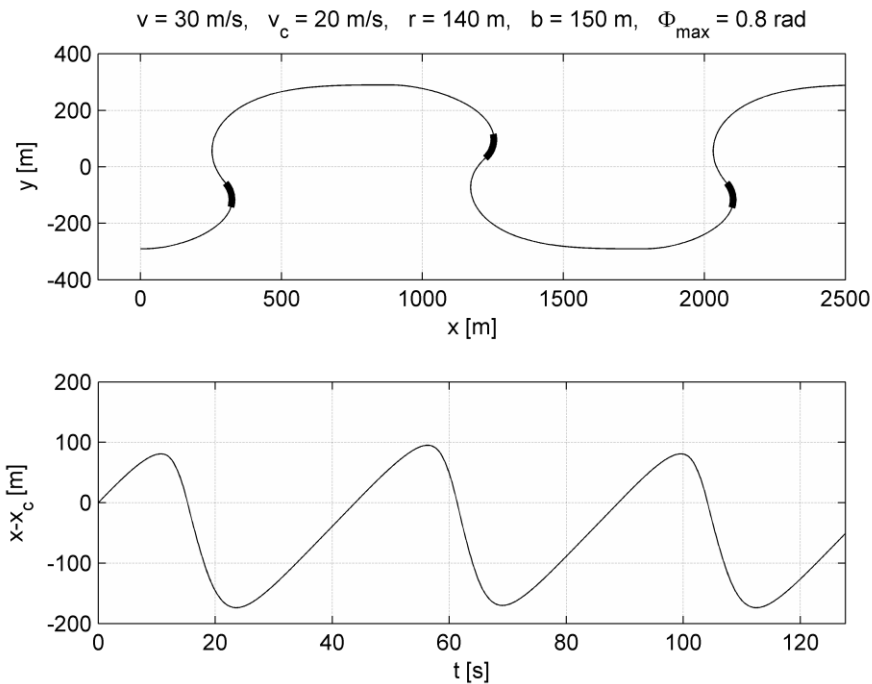
Rysunki 7, 8 i 9 przedstawiają tor lotu samolotu lecącego z prędkością  $v$  dla różnych prędkości konwojowanego pojazdu  $v_c$  dla takich samych parametrów jak przy metodzie krążenia.



Rys. 7. „Ósemkowanie” – tor lotu dla małych prędkości konwojowanego pojazdu  
 Fig. 7. “Eighting” – flight path for small speed of escorted vehicle



Rys. 8. „Ósemkowanie” – tor lotu dla średnich prędkości konwojowanego pojazdu  
 Fig. 8. “Eighting” – flight path for medium speed of escorted vehicle.



Rys. 9. Krążenie – tor lotu dla dużych prędkości konwojowanego pojazdu  
 Fig. 9. Circling – flight path for big speed of escorted vehicle

Na uwagę zasługuje zmniejszenie oscylacji odległości od samolotu od konwojowanego pojazdu ( $x - x_c$ ) przy większych prędkościach konwoju w porównaniu z metodą krążenia. Dla prędkości konwoju  $v_c = 20 \text{ m/s}$  i prędkości samolotu  $v = 30 \text{ m/s}$  amplituda oscylacji wynosi dla metody krążenia od ok. -320 do +100 m. Dla metody „ósemkowania” jest to odpowiednio od -180 do +100 m. Kształt toru lotu w tej metodzie w mniejszym stopniu wymaga wykonywania zakrętów z maksymalnym dopuszczalnym przechyleniem (pogrubiona część wykresu).

Niekorzystnym zjawiskiem jest większe niż w metodzie krążenia boczne odchylenie od trasy (ok. 300 m).

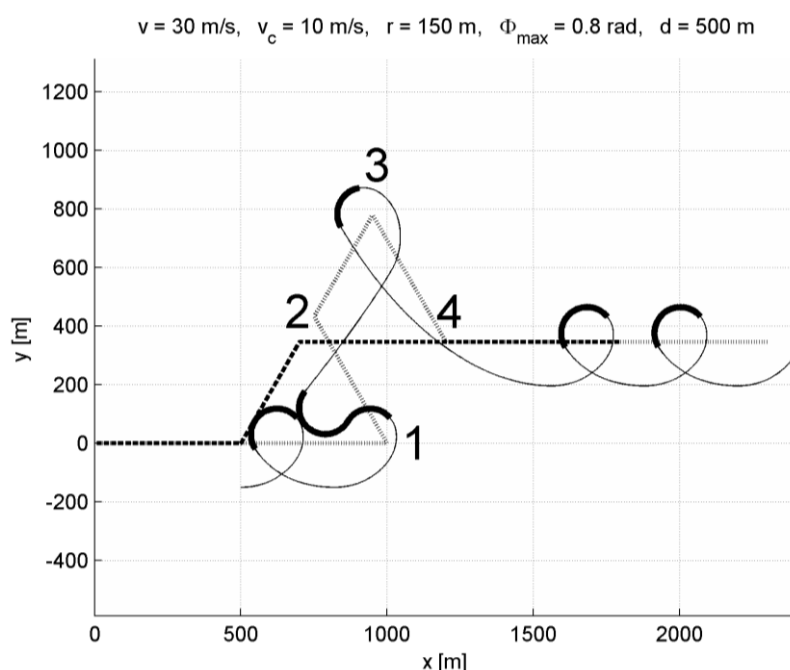
#### 4. Wpływ zmiany trasy konwoju na tor lotu samolotu

Założeniami przyjętymi w opisywanych metodach konwojowania pojazdów są: brak informacji o planowanej trasie poruszania się pojazdu oraz konieczność wyprzedzania pojazdu przez samolot o określoną odległość wzdłuż trasy. Założenia te są sprzeczne – przy nieznanym trasy nie można ściśle wyznaczyć żądanej pozycji geograficznej samolotu. W opisywanych metodach zastosowano predykcję żądanej pozycji środka okręgu lub ósemki ( $x_c, y_c$ ) na podstawie bieżącej pozycji i kierunku poruszania się pojazdu, przesuując wzdłuż tego kierunku pozycję pojazdu o określoną odległość  $d$ . Wykonanie przez pojazd zakrętu powoduje



szybką zmianę żądanej pozycji samolotu szczególnie widoczną przy większych wartościach  $d$ .

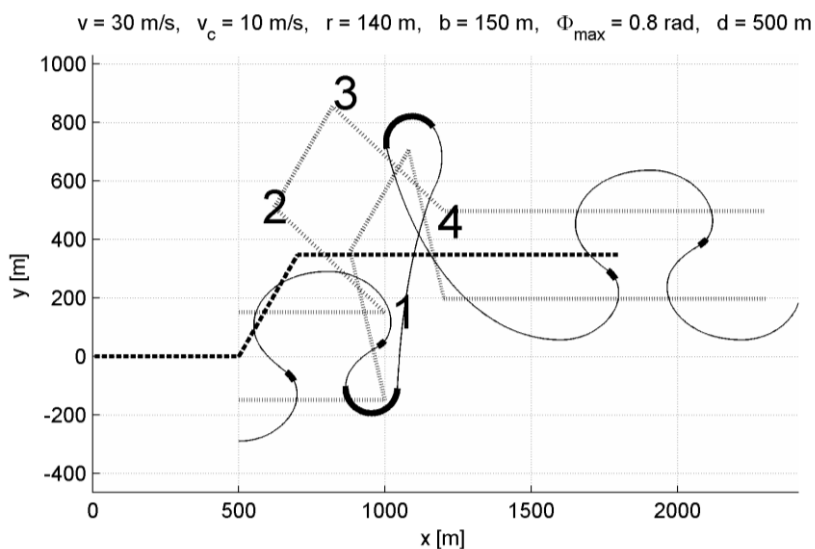
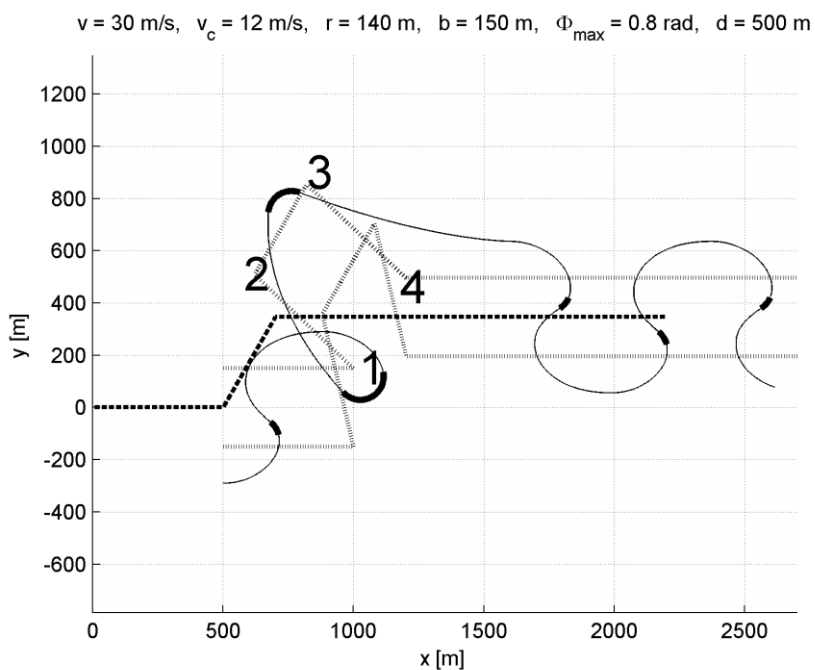
Na rys. 10 przedstawiono przykładowy tor lotu samolotu wykonującego zadanie konwojowania metodą krążenia. Linia przerywaną zaznaczono trasę pojazdu, linią kropkowaną obliczoną żądaną pozycję środka okręgu. Wykonanie zakrętu przez pojazd powoduje przeskok żądanego środka okręgu z punktu 1 do 2. Następnie środek okręgu płynnie przemieszcza się do punktu 3, gdzie następuje przeskok do punktu 4 spowodowany kolejnym zakrętem pojazdu.



Rys. 10. Krążenie – zmiana trasy konwojowanego pojazdu  
Fig. 10. Circling – change of escorted vehicle route

Rysunki 11 i 12 przedstawiają tę samą trasę przy zastosowaniu metody „ósemkowania”. Liniami kropkowanymi zaznaczono żądane pozycje środków obydwu okręgów (lewego i prawego), na których opiera się ta metoda. Wykresy te różnią się nieznacznie prędkością konwojowanego pojazdu, jednak tor lotu ma całkowicie odmienny kształt.

Z powyższych wykresów wynika, że nieznanie trasy konwojowanego pojazdu znacznie pogarsza własności obydwu przedstawionych metod konwojowania. Kształt toru lotu samolotu staje się mało przewidywalny, jest też w znacznym stopniu zależny od prędkości pojazdu. Podczas wykonywania zakrętów pojazdu samolot często osiąga maksymalny dopuszczalny kąt przechylenia.

Rys. 11. „Ósemkowanie” – zmiana trasy konwojowanego pojazdu ( $v_c=10 \text{ m/s}$ )Fig. 11. “Eighting” – change of escorted vehicle route ( $v_c=10 \text{ m/s}$ )Rys. 12. „Ósemkowanie” – zmiana trasy konwojowanego pojazdu ( $v_c=12 \text{ m/s}$ )Fig. 12. “Eighting” – change of escorted vehicle route ( $v_c=12 \text{ m/s}$ )

## 5. Podsumowanie

Przedstawione metody konwojowania pojazdów oraz ich symulacje nie uwzględniają dynamiki samolotu ani kamery. Nie został też uwzględniony wpływ wiatru. Ze względu na mały

moment bezwładności samolotów tej klasy uwzględnienie dynamiki samolotu nie spowoduje istotnych zmian w torze lotu.

Przedstawione metody będą rozwijane w następujących kierunkach:

- Sterowanie prędkością lotu samolotu w dopuszczalnym zakresie eksploatacyjnym. Szczególnie niekorzystnym zjawiskiem jest zmniejszenie odległości wyprzedzenia pojazdu przez samolot spowodowane przede wszystkim zakrętami pojazdu. W przypadku wykrycia takich sytuacji należałoby zwiększyć prędkość samolotu.
- Uwzględnienie wpływu wiatru. Oprogramowanie autopilota z reguły oblicza na bieżąco kierunek i prędkość wiatru. Dane te mogłyby być wykorzystane do sterowania prędkością samolotu oraz optymalizacji toru lotu.
- Wykorzystanie metod heurystycznych do poprawy predykcji trasy konwoju. Na przykład, wykonanie ostrego zakrętu jest często poprzedzone zwolnieniem pojazdu. Samolot mógłby wtedy zmniejszyć odległość wyprzedzenia, aby zminimalizować skutki zakrętu.
- Wykorzystanie metod rozpoznawania obrazów do określenia przebiegu trasy przed pojazdem. Można byłoby wykorzystać algorytmy uczące się cech trasy na podstawie przebytego odcinka.

## BIBLIOGRAFIA

1. Spry S. C., Girard A.R, Hedrick J. K.: Convoy Protection using Multiple Unmanned Aerial Vehicles: Organization and Coordination. 2005 American Control Conference, Portland 2005
2. Lee J., Huang R., Vaughn A., Xiao X., Hedrick J. K., Zennaro M., Sengupta R.: Strategies of Path-Planning for a UAV to Track a Ground Vehicle. Second Annual Symposium on Autonomous Intelligent Networks and Systems, Palo Alto 2003
3. Quigley M., Goodrich M. A., Griffiths S., Eldredge A., Beard R. W.: Target acquisition, localization, and surveillance using a fixed-wing, mini-uav and gimbaled camera. International Conference on Robotics and Automation, 2005.
4. Rafi F., Khan S., Shafiq K., Shah M.: Autonomous Target Following by Unmanned Aerial Vehicles. Proceedings of the SPIE, Volume 6230, 2006.
5. Stevens B. L., Lewis F. L.: Aircraft Control and Simulation. John Wiley & Sons, New Jersey 2003.
6. Kruczek W., Cyran K.: Sterowanie torem lotu samolotu bezzałogowego na podstawie położenia kąтового kamery. Studia Informatica, Wyd. Pol. Śląskiej, w tym zeszycie.

Wpłynęło do Redakcji 13 sierpnia 2012 r.

### **Abstract**

This paper presents two methods of flight path planning for the unmanned aerial vehicle (UAV) designed to terrain observation, performing a task of vehicles escorting. In the first method UAV circles at the specified distance ahead of escorted vehicle, along its route. In the second method UAV perform figures of “eight” (fig. 6). For both methods simulated flight paths are presented for several values of flight parameters (fig. 2-4, 7-9). The problem of route prediction is discussed and some simulations of escorted vehicle turn are presented (fig. 10-12).

### **Adresy**

Witold KRUCZEK: Politechnika Śląska, ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska, [witold.kruczek@gmail.com](mailto:witold.kruczek@gmail.com).

Krzysztof CYRAN: Instytut Informatyki, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, Polska, [krzysztof.cyran@polsl.pl](mailto:krzysztof.cyran@polsl.pl).