

Katarzyna GOSPODAREK¹

Opiekun naukowy: Adam KULAWIK²

ANALIZA I BUDOWA ALGORYTMU USTALANIA POŁOŻENIA KOŃCZYN BEZ ZASTOSOWANIA ZNACZNIKÓW

Streszczenie: Niniejsze opracowanie stanowi wprowadzenie do tematyki związanej z budową modelu matematycznego oraz numerycznego opisującego pozyskiwanie informacji o cechach chodu zwierząt czteronożnych na podstawie nagrań wideo. W publikacji omówiono schemat algorytmu odpowiedzialnego za pozyskiwanie danych na temat pozycji końców kończyn w kolejnych klatkach sekwencji wideo oraz jego zastosowanie w praktycznej aplikacji.

Słowa kluczowe: przetwarzanie obrazu, analiza chodu, kinematyka robotów kroczących.

ANALYSIS AND CREATING OF THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE POSITION OF THE LIMBS WITHOUT THE USE OF MARKERS

Summary: This paper is an introduction to the issues related to the construction of a mathematical and numerical model, which describe the acquisition of information on the gait characteristics of four-legged animals based of video recordings. The publication discusses the scheme of the algorithm responsible for obtaining data on the position of the ends of the limbs in subsequent frames of the video sequence and its practical application.

Keywords: image processing, gait analysis, kinematics of walking robots.

1. Wprowadzenie

W niniejszej pracy zostaną przybliżone zagadnienia związane z uzyskaniem informacji na temat charakterystyki chodu zwierząt czteronożnych na podstawie analizy nagrań wideo. Powstałe w ramach pracy modele numeryczne mają być elementem wejściowym procesu tworzenia robota kroczącego, którego ruch będzie ściśle opierał się na rzeczywistych cechach chodu czworonogów. Pozyskiwanie tego

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, specjalność: informatyka, gospodarek@icis.pcz.pl

² dr hab. inż., Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, adam.kulawik@icis.pcz.pl

rodzaju danych, ilustrujących rzeczywiste ruchy poszczególnych segmentów bądź punktów kostnych kończyn czworonogów podczas chodu jest jednym z kluczowych elementów wielu różnorodnych prac badawczych. Różnorodność ta objawia się przede wszystkim w obszarach tematycznych przeprowadzanych badań.

W dość znaczącej części prac omawiany rodzaj danych wykorzystywany jest w badaniach związanych z medycyną, w szczególności odnoszących się do dziedzin neurologicznych. W pracach związanych z określeniem poziomu adaptacji wzorców aktywacji mięśni, w zależności od specyficznych warunków, przeprowadzana jest np. analiza korelacji informacji pozyskiwanych z nagrań chodu zwierząt z zapisem sygnałów EMG dla mięśni biorących w nim udział [1, 2]. W Kolejnej grupie prac badawczych nagrania chodu zwierząt są wykorzystywane m.in. do uzyskania informacji na temat proporcji poszczególnych segmentów kończyn u różnych powiązanych ze sobą gatunków oraz wpływu danych proporcji na różnice pojawiające się w charakterystycznych dla nich wzorcach chodu [3, 4]. Ostatnia ze znaczących grup badań wykorzystujących dane ilustrujące rzeczywiste ruchy poszczególnych punktów kostnych kończyn czworonogów związana jest ściśle z grafiką komputerową oraz animacją. W publikacjach z tych dziedzin dane pozyskane z nagrań przedstawiane są jako doskonałe zbiory uczące dla systemów sztucznej inteligencji wykorzystywanych w procesie generowania parametrów chodu [5, 6]. Parametry te mogą być generowane dla dobrze znanych gatunków, ale także dla sztucznie zamodelowanych hybryd [5].

Cechą wspólną dla wszystkich powyżej przytoczonych prac jest wykorzystanie w procesie badawczym informacji na temat zmian pozycji określonych segmentów lub punktów referencyjnych kończyn podczas chodu. Informacje te są pozyskiwane na podstawie analizy określonych sekwencji wideo. W przeważającej liczbie publikacji (przykłady: [1, 2, 3, 4, 6]) w celu uzyskania tego typu danych, rejestrowane na nagraniach czworonogi zostają specjalnie oznakowane w wybranych punktach kostnych. Dla kotów, bądź psów dodatkowo znaczniki są zwykle umieszczane m.in. na: grzebieniu biodrowym, krętarzu większym, głowie kości piszczelowej, kostce bocznej oraz podstawie kości piętowej [2]. Na przestrzeni ostatnich trzech dekad w procesie pozyskiwania omawianych danych zmienia się tylko rodzaj wykorzystywanych znaczników. W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku biorące udział w badaniach czworonogi były golone, a w miejscach, znaczących dla późniejszych analiz, punktów kostnych przyklejano odbłaskowe fragmenty taśmy [2]. Podczas aktualnie prowadzonych badań, najczęściej wykorzystywane są systemy stosujące jako znaczniki specjalnie zaprojektowane opaski z diodami LED [6].

Jako wyjątek od szeroko stosowanego podejścia opierającego się na wykorzystaniu dodatkowych znaczników w procesie pozyskiwania informacji o położeniu konkretnych punktów referencyjnych, istotnych podczas analizy chodu, można przytoczyć rozwiązanie opisywane w publikacji [5]. Autorzy w celu uzyskania danych na podstawie filmów opublikowanych na ogólnodostępnych platformach takich jak YouTube czy Flickr Video, interesujące ich punkty referencyjne zaznaczali ręcznie dla każdej z analizowanych klatek wybranej sekwencji. Tego rodzaju podejście umożliwiło autorom pozyskanie danych dotyczących o wielu zróżnicowanych gatunkach. Zbudowana przez nich baza obejmuje 12 gatunków

zwierząt czterożnych oraz 6 gatunków zwierząt dwunożnych. Natomiast sam proces pozyskiwania danych na temat charakterystyki przemieszczania się wybranych punktów podczas cyklu chodu dla konkretnego gatunku był w tym wypadku niezwykle czasochłonny i wymagał dużego zaangażowania zespołu badawczego.

Ze względu na fakt, że pozyskiwanie tego typu informacji, m.in. danych o przemieszczaniu się końców kończyn podczas poszczególnych faz chodu, jest zwykle tylko jednym ze składowych elementów większych prac badawczych niniejsze opracowanie przedstawia możliwości związane z usprawnieniem tego procesu.

W zaproponowanym rozwiązaniu informacje są pozyskiwane bezpośrednio z sekwencji wideo zawierających kilka cykli chodu zwierzęcia za pomocą podstawowych technik przetwarzania obrazów cyfrowych. Analizowane w trakcie badań nagrania zawierają ruchy zwierzęcia zarejestrowane w określonych warunkach. Natomiast podczas ich rejestracji nie zastosowano dodatkowych oznaczeń dla żadnego z punktów referencyjnych.

2. Zaproponowane rozwiązanie

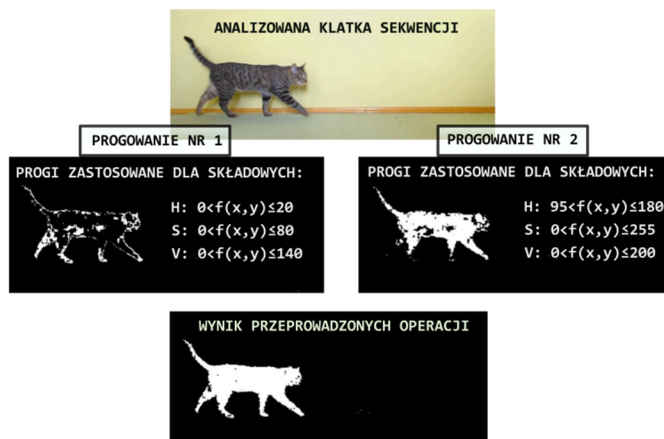
Podczas prac nad projektem oprogramowania umożliwiającemu uzyskiwanie informacji na temat chodu wykorzystując klasyczne nagrania wideo szczególny nacisk położono na przetestowanie możliwości wyznaczenia jak najdokładniejszego położenia końcówek kończyn w kolejnych klatkach analizowanych sekwencji. Uznano, że etap ten jest kluczowy z punktu widzenia całego procesu wyznaczenia trajektorii stóp czworonoga dla jednego, wzorcowego cyklu chodu. Z tego względu na danym etapie prac pominięto fragmenty związane np. z ustalaniem kolejności wykrywanych podczas ruchu końców co będzie stanowił kolejny etap prowadzonych prac badawczych.

Operacje wstępne

Charakterystyka zaproponowanego rozwiązania opiera się w zupełności na zastosowaniu metod analizy i przetwarzania obrazów do pozyskania wszystkich niezbędnych informacji. Każda klatka badanej sekwencji jest poddawana szeregowi operacji umożliwiających odnalezienie współrzędnych końców wszystkich widocznych kończyn.

Segmentacja obiektu testowego, w danym wypadku kota, opiera się na wykorzystaniu informacji o jego kolorze w przestrzeni barw HSV. Wyodrębnienie z tła obiektu zainteresowań wykorzystuje zduplikowaną operację progowania z podwójnym progami dla każdego kanału wykorzystywanego modelu barw: częstotliwości światła (ang. Hue), nasycenia koloru (ang. Saturation) oraz mocy światła białego (ang. Value). Istota procesu powielenia operacji progowania została przedstawiona na rysunku nr 1. Jego głównym zadaniem jest jak najdokładniejsze wyizolowanie palety barw dla konkretnego umaszczenia zwierzęcia, ze względu częste przypadki posiadania różnobarwnego futra przez analizowanego osobnika. Dzięki takiemu

rozwiązaniu można uzyskać dosyć dobre odwzorowanie obiektu testowego w postaci obrazu binarnego, który w kolejnych etapach zostaje poddany dalszej analizie.



Rysunek 1. Schemat powielonego progowania dwupoziomowego zastosowanego w oprogramowaniu, zadane dla analizowanego osobnika wartości zostały przedstawione dla przedziałów $H(0-180)$, $S(0-255)$, $V(0-255)$

W przypadku reprezentacji dwuwymiarowej można go wyznaczyć wykorzystując wzór na dwuwymiarowy moment geometryczny rzędu $(p + q)$ dla funkcji $f(x, y)$ [8]:

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p \cdot y^q \cdot f(x, y) dx dy \quad (1)$$

Ze względu na fakt, że w przypadku analizy obrazu cyfrowego podwójne całki można aproksymować sumami, dla prostokątnej matrycy o wymiarach $[m \times n]$, składającej się z punktów x_{ij} powyższy wzór można zastąpić przez wzór na dyskretny moment zwykły:

$$m_{pq} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n i^p \cdot j^q \cdot x_{ij} \quad (2)$$

gdzie: i, j – współrzędne analizowanego punktu (pixela),
 m, n – rozdzielczość obrazu,
 x_{ij} – wartość analizowanego punktu (pixela).

Stąd, wzór na moment zwykły rzędu zerowego jest sumą wartości poszczególnych pikseli i ma postać [7]:

$$m_{00} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

Natomiast momenty rzędu pierwszego $(1,0)$ i $(0,1)$ są równe [7]:

$$m_{10} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n i^1 \cdot j^0 \cdot x_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n i \cdot x_{ij} \quad (4)$$

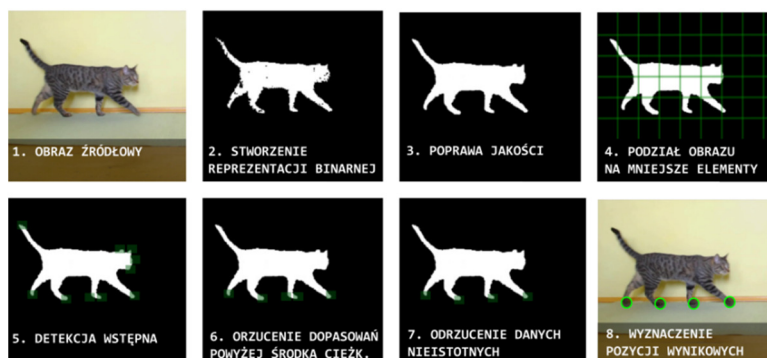
$$m_{01} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n i^0 \cdot j^1 \cdot x_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n j \cdot x_{ij} \quad (5)$$

Momenty te są wykorzystywane do wyznaczenia współrzędnych środka ciężkości obiektów na obrazach cyfrowych zgodnie z wzorami poniżej [7]:

$$\tilde{i} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad \tilde{j} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (6)$$

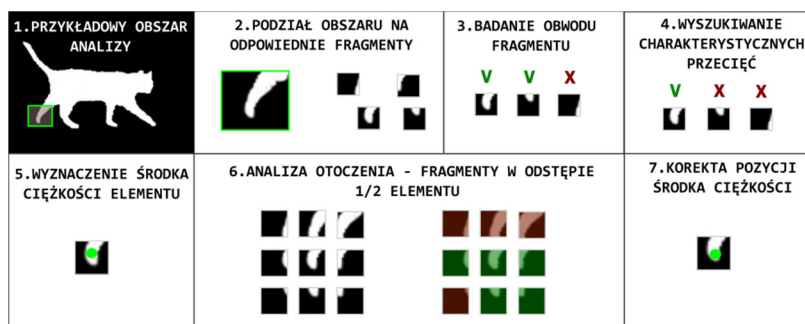
Schemat funkcjonalny

Kolejne etapy analizy wykorzystują informacje wstępnie przygotowane w sposób omówiony we wcześniejszym podrozdziale. Binarna reprezentacja obiektu oraz współrzędne jego środka ciężkości stanowią parametry wejściowe dla zaprojektowanego algorytmu. Schematycznie proces jego działania został przedstawiony na rysunku nr 2.



Rysunek 2. Funkcjonalny schemat algorytmu odpowiedzialnego za wyznaczenie końców kończyn dla binarnej reprezentacji czworonoga

Operacje początkowe algorytmu są ściśle związane z podziałem macierzy reprezentującej obraz cyfrowy na zbiór mniejszych elementów, które będą reprezentować jego fragmenty. Wielkość elementów na jakie dzielony jest obraz, podawana jest do programu jako osobny parametr. Jego wartość definiuje rozmiar kwadratowego wycinka obrazu źródłowego. Następnie budowana jest macierz odpowiedzialna za przechowywanie informacji o możliwości reprezentacji końca kończyny dla każdego z wyznaczonych w powyższy sposób fragmentów.



Rysunek 3. Schemat procesu analizy dla pojedynczego wycinka obrazu

Sama procedura analizy pojedynczego wycinka obrazu jest procesem wieloetapowym, na który składa się szereg operacji (rysunek nr 3). Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

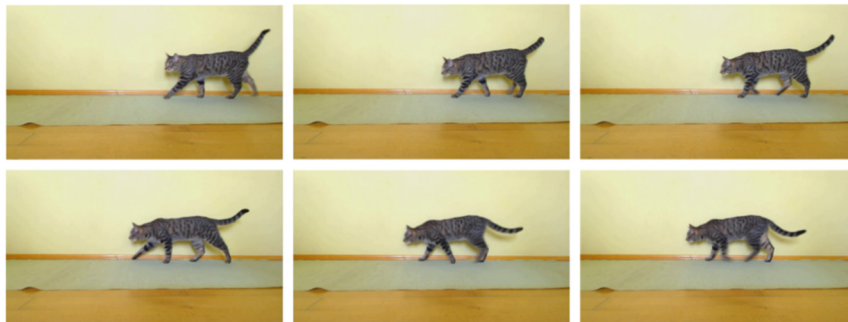
- sprawdzenie czy dany fragment wnosi jakieś istotne informacje;
- sprawdzenie obwodu danego fragmentu pod kątem zawierania przez niego charakterystycznych przecięć;

- jeżeli istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia końcówki - wyznaczenie środka ciężkości dla danego fragmentu;
- analiza bliskiego otoczenia danego fragmentu (siatka 3x3) – w celu zwiększenia dokładności wyznaczenia środka ciężkości dla odnalezionej końcówki;

Następnie wykonywane są operacje odpowiedzialne za eliminację błędnych dopasowań, np. w przypadku gdy odnalezione końce znajdują się w zbyt bliskiej odległości. Na tym etapie odrzucane są także dopasowania znajdujące się w określonych odległościach od środka ciężkości analizowanego obiektu, co pozwala odróżnić końce stóp od np. uszu zwierzęcia. Przytoczone powyżej przykłady są przedstawione w dużym uproszczeniu, mają one za zadanie przede wszystkim przedstawić samą istotę końcowej obróbki uzyskiwanych przez oprogramowanie wyników.

3. Badania testowe

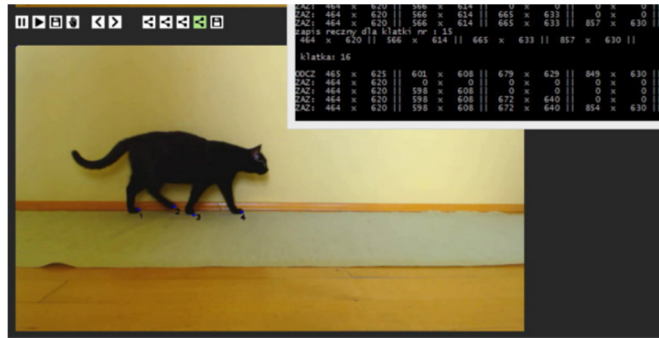
Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja poprawności funkcjonowania modelu numerycznego odpowiedzialnego za wyznaczenie położenia końców kończyn (dokładniej uśrednionych końców kości palców konkretnej stopy) zwierzęcia zarejestrowanego na analizowanym nagraniu. Baza testowa wykorzystywana podczas badań obejmuje dziesięć kilkusekundowych sekwencji wideo, nagrywanych z prędkością 25 fps, zawierających zarejestrowany chód kota w płaszczyźnie strzałkowej (rysunek nr 4) . Każde z nagrań obejmuje kilka cykli chodu, co pozwala wyznaczyć na ich podstawie uśrednione wyniki mogące reprezentować konkretnego osobnika.



Rysunek 4. Wybrane klatki sekwencji wideo ilustrujące chód kota zarejestrowany w płaszczyźnie strzałkowej

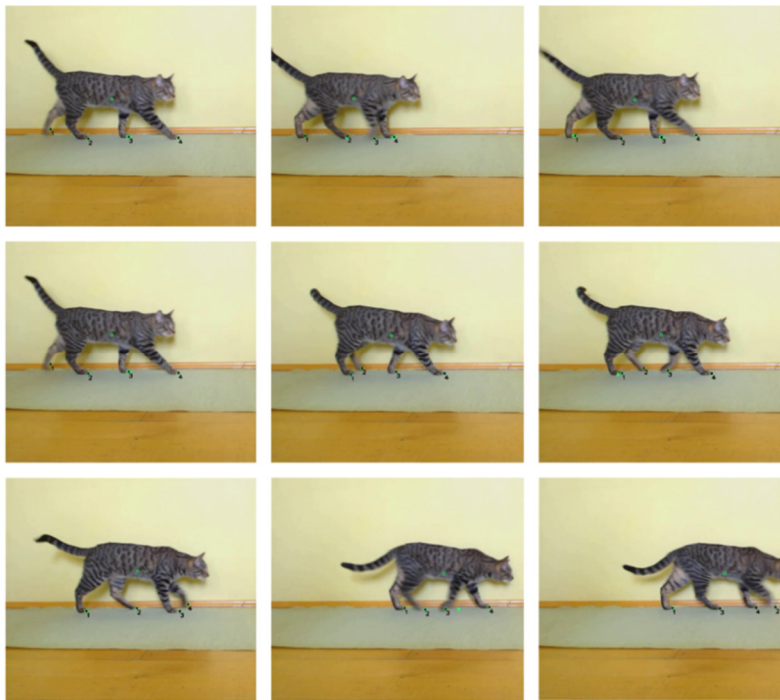
Dla każdej analizowanej sekwencji wideo przeprowadzane badania związane z wyznaczaniem położenia końców kończyn w poszczególnych klatkach zostały podzielone na dwie fazy. Podczas pierwszej wykorzystywano specjalnie zaprojektowany moduł oprogramowania umożliwiający ręczne zaznaczenie pozycji elementów wyszukiwanych na analizowanej klatce filmu (rysunek nr 5), wzorując się

na rozwiązaniu zastosowanym w pracy [5]. Dane uzyskane w tej fazie miały posłużyć w dalszej części badań jako wzorcowe.



Rysunek 5. Moduł oprogramowania umożliwiający ręczne zaznaczenie pozycji elementów wyszukiwanych na analizowanej klatce filmu

W drugiej fazie badań przeprowadzono właściwe testy mające na celu ocenę funkcjonowania zaproponowanych rozwiązań numerycznych w procesie detekcji końców kończyn czworonoga.



Rysunek 6. Wybrane klatki sekwencji wideo ilustrujące chód kota z zaznaczonymi pozycjami końców kończyn uzyskanymi przez zaimplementowane oprogramowanie

Weryfikację poprawności oraz dokładności wyników uzyskanych w ramach pracy zaimplementowanego algorytmu oparto na porównaniach ich wartości z wartościami

wzorcowymi uzyskanymi w poprzedniej fazie przeprowadzanej analizy. Uzyskiwane przez algorytm wyniki ilustruje rysunek nr 6. Wszystkie wyniki uzyskane w procesie detekcji, przedstawione poniżej, zostały uzyskane dla przypadku podziału obrazu na elementy o wielkości 40x40 pikseli. Dany rozmiar został dobrany w sposób eksperymentalny.

W tabelach poniżej (tabele nr 1-3) przedstawiono wartości błędów względnych uzyskanych dla przykładowych dwunastu analizowanych klatek dla trzech wybranych sekwencji video. Dany błąd jest wyznaczany ze wzoru:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} = \frac{|x-x_0|}{x} \quad (7)$$

gdzie: Δx – to błąd bezwzględny pomiaru,
 x – to wartość wzorcowa,
 x_0 – to wartość zmierzona.

Błąd bezwzględny w tym wypadku jest definiowany przez różnicę pomiędzy współrzędnymi wzorcowymi danego końca kończyny, a współrzędnymi wyznaczonymi przez testowany algorytm.

Tabela 1. Błędy względne δ uzyskane dla sekwencji video nr 1

Nr końcówki	1		2		3		4		Średnia dla całej klatki	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
6	0,048	0,000	0,005	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,014	0,002
7	0,040	0,003	0,005	0,003	0,000	0,003	0,004	0,004	0,012	0,003
8	0,005	0,006	0,008	0,003	0,001	0,002	0,003	0,002	0,004	0,003
9	0,006	0,013	0,008	0,004	0,001	0,001	0,007	0,002	0,005	0,004
10	0,011	0,013	0,005	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,005	0,004
11	0,625	0,000	0,009	0,004	0,001	0,003	0,003	0,000	0,160	0,001
12	0,313	0,313	0,009	0,008	0,001	0,001	0,004	0,000	0,082	0,064
13	0,006	0,005	0,001	0,003	0,008	0,000	0,005	0,002	0,005	0,002
14	0,011	0,002	0,003	0,002	0,009	0,001	0,005	0,002	0,007	0,001
15	0,011	0,001	0,001	0,003	0,012	0,000	0,006	0,000	0,008	0,001
16	0,000	0,313	0,016	0,001	0,003	0,001	0,006	0,004	0,006	0,064
17	0,313	0,313	0,013	0,000	0,009	0,001	0,004	0,001	0,085	0,063

Tabela 2. Błędy względne δ uzyskane dla sekwencji video nr 3

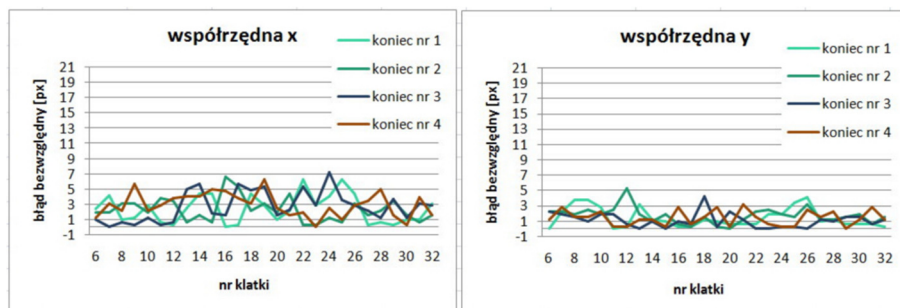
Nr końcówki	1		2		3		4		Średnia dla całej klatki	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
10	0,011	0,007	0,001	0,003	0,001	0,001	0,003	0,004	0,004	0,003
11	0,005	0,001	0,002	0,002	0,005	0,000	0,001	0,004	0,003	0,001
12	0,007	0,009	0,000	0,000	0,005	0,002	0,002	0,000	0,003	0,002
13	0,004	0,007	0,002	0,002	0,005	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003
14	0,010	0,006	0,003	0,001	0,004	0,001	0,003	0,000	0,005	0,002
15	0,012	0,004	0,001	0,004	0,000	0,004	0,001	0,000	0,003	0,003
16	0,313	0,625	0,003	0,002	0,002	0,000	0,001	0,000	0,079	0,125
17	0,005	0,002	0,001	0,004	0,003	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002

18	0,001	0,004	0,004	0,003	0,005	0,001	0,003	0,000	0,003	0,002
19	0,001	0,003	0,002	0,000	0,003	0,005	0,002	0,000	0,002	0,002
20	0,003	0,002	0,001	0,002	0,009	0,001	0,001	0,001	0,004	0,001
21	0,002	0,002	0,002	0,001	0,018	0,018	0,001	0,001	0,006	0,004

Tabela 3. Błędy względne δ uzyskane dla sekwencji video nr 5

Nr końcówki	1		2		3		4		Średnia dla całej klatki	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
21	0,006	0,001	0,007	0,002	0,006	0,002	0,002	0,005	0,005	0,002
22	0,016	0,001	0,000	0,003	0,006	0,000	0,002	0,003	0,006	0,001
23	0,007	0,003	0,000	0,004	0,003	0,000	0,000	0,001	0,003	0,002
24	0,010	0,003	0,002	0,003	0,009	0,000	0,002	0,000	0,006	0,001
25	0,014	0,005	0,001	0,002	0,009	0,000	0,001	0,000	0,006	0,002
26	0,008	0,007	0,005	0,005	0,008	0,000	0,003	0,004	0,006	0,003
27	0,313	0,938	0,002	0,002	0,002	0,002	0,004	0,002	0,080	0,189
28	0,625	1,250	0,003	0,002	0,001	0,001	0,006	0,003	0,159	0,251
29	0,000	0,001	0,005	0,002	0,007	0,002	0,001	0,000	0,003	0,001
30	0,938	0,625	0,002	0,003	0,002	0,002	0,000	0,002	0,235	0,126
31	0,938	0,625	0,001	0,001	0,004	0,001	0,011	0,004	0,238	0,126
32	0,005	0,000	0,001	0,002	0,003	0,002	0,001	0,002	0,003	0,001

Na rysunku nr 7 zostało przedstawione podsumowanie uzyskanych wyników dla nagrania nr 6, w postaci zestawienia błędów bezwzględnych otrzymanych dla przykładowych kilkudziesięciu klatek. W danym przypadku wartość błędu dla całej sekwencji nie przekroczyła 10 [px] dla żadnej współrzędnej analizowanych końców.



Rysunek 7. Wykres wartości błędów bezwzględnych uzyskanych podczas analizy sekwencji nr 6.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone w ramach pracy badania pozwalają na stwierdzenie, że możliwe jest zaprojektowanie i stworzenie modelu numerycznego umożliwiającego automatyczne pozyskiwanie informacji o wybranych cechach chodu zwierząt czterożnych na podstawie nagrań wideo. Należy podkreślić, że filmy poddawane analizie nie zawierały żadnych znaczników ułatwiających wyszukiwanie konkretnych elementów na obrazie. Dzięki temu rozpatrywane osobniki nie muszą być w tym wypadku

specjalnie przygotowywane. Jest to bardzo korzystne, ponieważ pozwala na wykorzystywanie w procesie pozyskiwania informacji materiałów z ogólnodostępnych baz filmowych.

Podczas badań zauważono duży związek między poprawnością wartości współrzędnych uzyskiwanych przez program, a wielkością analizowanych fragmentów obrazu. Dana wielkość była dla konkretnej sekwencji wideo dobierana w sposób eksperymentalny, jednakże w dalszych etapach badań rozważa się automatyzację także tego zadania.

Wyniki procesu detekcji, uzyskane przez zaproponowane rozwiązania programowe, nie odbiegały znacząco od tych uzyskanych poprzez zaznaczanie wyszukiwanych elementów ręcznie. Maksymalny błąd względny nie przekraczał wartości 1,3. Co świadczy o tym, że zbudowany algorytm może pozwolić na automatyzację oraz znaczące przyspieszenie przebiegu tego rodzaju analiz.

LITERATURA

1. ZHONG H., ROY R.R., NAKADA K.K., ZDUNOWSKI S., KHALILI N.: Accommodation of the Spinal Cat to a Tripping Perturbation. *Frontiers In Physiology*, 3, 112 (2012).
2. LOVELY R.G., GREGOR R.J., ROY R.R., EDGERTON V.R.: Weight-bearing hindlimb stepping in treadmill-exercised adult spinal cats, *Brain Research*, 514, 2 (1990), 206-218.
3. PIKE A. V. L., ALEXANDER R. M.: The relationship between limb-segment proportions and joint kinematics for the hind limbs of quadrupedal mammals. *Journal of Zoology*, 258, 4(2002), 427-433.
4. REN L., BUTLER M., MILLER C., PAXTON H., SCHWERDA D.: The movements of limb segments and joints during locomotion in African and Asian elephants. *The Journal of Experimental Biology*, 211(2008), 2735-2751.
5. WAMPLER K., POPOVIC Z., POPOVIC J.: Generalizing Locomotion Style to New Animals With Inverse Optimal Regression. *ACM Transactions on Graphics*, 33(2014), 1-11.
6. ZHANG H., STARKE S., KOMURA T., SAITO J.: Mode-Adaptive Neural Networks for Quadruped Motion Control. *Transactions on Graphics*, 37, 4(2018), Article 145:1-11.
7. BRADSKI G., KAEHLER A.: *Learning OpenCV. Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2008.
8. RAFAJŁOWICZ E., RAFAJŁOWICZ W.: *Wstęp do przetwarzania obrazów przemysłowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2010.