

Jerzy TCHÓRZEWSKI*
Piotr LEWANDOWSKI*

SYSTEMOWY ALGORYTM EWOLUCYJNY DO POPRAWY PARAMETRÓW ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO PR-02

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące wykorzystania Systemowego Algorytmu Ewolucyjnego (SAE) do poprawy modelu ruchu robota przemysłowego PR-02 w środowisku MATLAB i Simulink. Poprawa dotyczy przebiegu trajektorii jaką kreśli koniec ramienia robota dla zadanego punktu początkowego i punktu końcowego. W celu realizacji ww. postawionego zadania: zmodyfikowano algorytm SAE dostosowując go do warunków ruchu robota PR-02, a następnie zaimplementowano w środowisku MATLAB jako zintegrowany algorytm SAE (ZSAE). Przeprowadzono też odpowiednie eksperymenty symulacyjne dotyczące badania wrażliwości ruchu robota PR-02 na zmiany parametrów modelu.

SŁOWA KLUCZOWE: algorytmy ewolucyjne, roboty przemysłowe, środowisko MATLAB i Simulink, modele matematyczne, symulacja komputerowa

1. WPROWADZENIE

Wykorzystany w eksperymentach obliczeniowych robot przemysłowy PR-02 posiada łańcuch kinematyczny składający się z czterech ogniw połączonych ze sobą czterema przegubami: dwa przeguby o możliwości realizacji ruchu liniowego oraz dwa realizujące ruch obrotowy. Do optymalizacji trajektorii ruchu końca robota przemysłowego PR-02 wykorzystano Systemowy Algorytm Ewolucyjny (SAE) uzupełniając go o elementy wynikające z modelu ruchu robota przemysłowego PR-02. W ten sposób otrzymano Zmodyfikowany Systemowy Algorytm Ewolucyjny (ZSAE), który obejmuje m.in. pobieranie wektorów czteroelementowych $[\theta_1, \lambda_2, \lambda_3, \theta_4]$ określających jeden punkt pierwotnego przebiegu trajektorii z puli 30 punktów, losowanie populacji początkowej (PP) dla danego osobnika, przeprowadzanie selekcji przy wykorzystaniu funkcji przystosowania (najlepiej przystosowane osobniki to te, których chromosom wskazuje na punkt leżący najbliżej średniej odległości wszystkich punktów od punktu pierwotnego), poddawanie osobników operatorom ewolucyjnym, takim jak: krzyżowanie oraz mutacja, wyznaczanie kolejnego pokolenia osobników

* Uniwersytet Przyrodniczo-Humanistyczny w Siedlcach.

(punktów), co dzieje się do momentu nieprzekroczenia liczby cykli kolejnych pokoleń, po czym wybierany jest najlepszy osobnik z populacji, który jako najlepszy chromosom, staje się punktem nowej trajektorii. Wynikiem jednego wykonania cyklu algorytmu SAE jest ustalenie jednego punktu, dlatego też do wyznaczenia całej trajektorii należy wykonać 30 obliczeń.

2. MODEL MATEMATYCZNY RUCHU ROBOTA PR-02

Robot przemysłowy PR-02 został opracowany w Warszawskim Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów w latach 1976-1980 [2-4, 6, 8-9]. Jego modułowa budowa pozwala na konfigurację członu manipulacyjnego. Każdy moduł zapewnia jeden stopień swobody [2-5, 9]. Dzięki tej właściwości przestrzeń pracy robota może być różnaita, a w zależności od zamontowanej kiści jego prace mogą mieć różny charakter.

Do wyznaczenia współrzędnych położenia końcówki ramienia w przestrzeni została wykorzystana notacja Denavita-Hartenberga (D-H), która opiera się na macierzowym przedstawieniu położenia oraz orientacji ciała [2, 5, 9]. W celu obliczenia położenia końcówki ramienia robota należy obliczyć przesunięcia poszczególnych czterech układów. Posiadając informacje o parametrach D-H (tabela 1) robota przemysłowego PR-02 możliwe jest wyznaczenie położenia końcówki ramienia robota w przestrzeni trójwymiarowej, a tym samym określenie przebiegu trajektorii.

Tabela 1. Parametry D-H opisujące robota przemysłowego PR-02

nr pary	α_i	l_i [m]	λ_i [m]	θ_i [°]
1	0	0	0	-300±0°
2	-90°	-0.110	0±0.200	0
3	0	0	0.376±0.676	-90°
4	0	0	0	0±360°

Z punktu widzenia ruchu robota PR-02 istotne są zatem się cztery parametry (tabela 1):

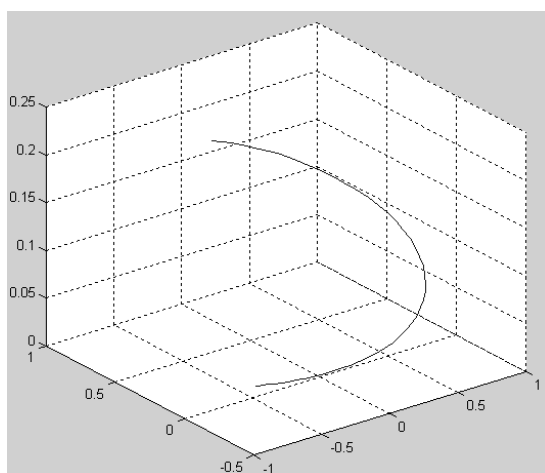
λ_2 – wartość tego parametru ma wpływ na aktualną wysokość na jakiej zawieszona jest platforma manipulatora; wartość ta waha się pomiędzy 0,0 m oraz 0.200 m.,

λ_3 – wartość tego parametru określa jak daleko od podstawy robota wysunięte jest ramię. Może wynosić od 0.376 m. do 0.676 m. i jest blokowana przez fizyczną konstrukcję robota,

θ_1 – wartość tego parametru ma bezpośredni wpływ na obrót całej platformy; θ_1 może przyjmować wartości pomiędzy -300°, a 0°,

θ_4 – jest to wartość obrotu ostatniego członu robota; θ_4 przyjmuje wartości od 0° do 360°, a zatem człon ten może wykonać pełny obrót wokół własnej osi.

Poprzez zmianę powyższych czterech parametrów D-H można bezpośrednio sterować ruchem manipulatora robota PR-02, m.in. wpływać na (rys. 1): podnoszenie ramienia głównego na wysokość maksymalnie 20 cm, niepełny obrót wokół własnej osi wynoszący do 300°, wysunięcie ramienia do maksymalnie 30 cm, pełny obrót wokół własnej osi ostatniego członu łańcucha kinematycznego.



Rys. 1. Trajektoria ruchu robota PR-02. Źródło: [6]

Przebieg trajektorii ruchu robota PR02 przedstawionego na rys. 1 został otrzymany na podstawie 30 punktów, wyznaczonych na podstawie kolejnych czwórek parametrów D-H oraz zmian parametrów z tabeli 2.

Tabela 2. Parametry D-H badanego ruchu. Źródło: [9]

Parametr	Θ_1	λ_2	λ_3	Θ_4
Zakres parametru	$-300 \div 0^\circ$	$0 \div 0.200$ m	$0.376 \div 0.676$ m	$0 \div 360^\circ$
Początkowa wartość	-300°	0 m	0.376 m	0
Krok (wartości przybliżone)	10°	7 mm	10 mm	12°

3. ZINTEGROWANY SYSTEMOWY ALGORYTM EWOLUCYJNY

ZSAE wykorzystany do poprawy przebiegu trajektorii wykorzystuje ideę algorytmu SAE [6, 11], uzupełnioną o elementy wynikające z modelu ruchu robota PR-02 oraz teorii robotyki, który można sprowadzić do następujących podstawowych kroków:

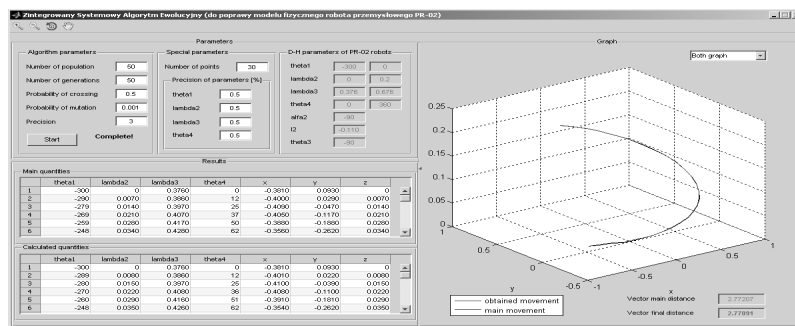
1. Pobieranie kolejnego wektora parametrów $[\Theta_1, \lambda_2, \lambda_3, \Theta_4]$ ze zbioru 30 punktów określających trajektorię ruchu robota PR-02, przy czym punkt pierwszy i ostatni nie bierze udziału w optymalizacji.
2. Losowanie populacji początkowej dla danego osobnika.
3. Selekcja osobników z populacji początkowej (PP) na podstawie funkcji przystosowania (FP) – najlepiej przystosowane osobniki to te, których chromosom wskazuje na punkt leżący najbliżej średniej odległości wszystkich punktów od punktu pierwotnego. Selekcja wykonywana jest metodą koła ruletki.
4. Poddawanie operatorom ewolucyjnym najlepiej przystosowanych osobników, takich jak: krzyżowanie (jednopunktowe) par osobników oraz mutacja (zmiana bitu na przeciwny dla postaci binarnej danego parametru w chromosomie).
5. Tworzenie nowej populacji z otrzymanych chromosomów i jeżeli nie przekroczono ustalonej liczby cykli kolejnych pokoleń, to algorytm powraca do kroku 2. W przeciwnym wypadku wybierany jest najlepszy osobnik z populacji (na podstawie FP), który staje się punktem nowej trajektorii.
6. Jeżeli nie pobrano wszystkich punktów pierwotnego przebiegu trajektorii to algorytm powraca do kroku 1. W przeciwnym wypadku algorytm kończy działanie, a zbiór wszystkich otrzymanych nowych punktów tworzy nową trajektorię ruchu robota PR-02.

Przebieg trajektorii robota PR-02 można zatem opisać za pomocą funkcji, która jest zbiorem ww. punktów określonych przez wektory złożone z czterech składowych (parametrów modelu). Wielkość oraz kształt tej funkcji jest zależna od doboru parametrów D-H. Reasumując, wielkość populacji określa liczbę punktów w przestrzeni, na podstawie których kreślony jest przebieg trajektorii końcówki ramienia robota.

4. IMPLEMENTACJA ALGORYTMU ZSAE W ŚRODOWISKU MATLAB

Zaprojektowano ZSAE w środowisku MATLABA z GUI jak na rys. 2. Główne okno programu ZSAE podzielone jest na sekcje. Sekcja *Parameters* przedstawiona na rys. 2 położona jest w lewym górnym rogu i zawiera parametry programu podzielone na trzy części: *Algorithm parameters*, *Special parameters*, *D-H parameters of PR-02 robots*.

W celu poprawy trajektorii robota PR-02 przeprowadzono szereg testów oraz badań, m.in. testy parametrów: prawdopodobieństwa krzyżowania (p_k), prawdopodobieństwa mutacji (p_m), precyzji zmiennych (p_z), liczby generacji (l_g) oraz wielkości populacji (l_p), które jako początkowe wynosiły: $p_k = 0.5$, $p_m = 0.001$, $p_z = 0.5\%$, $l_p = 50$, $l_g = 50$, $l_p = 30$. Pierwotna badana trajektoria miała długość 2.77207 m i była podstawą do analizy wyników testu dla 50 populacji dla poszczególnych 30 punktów. W eksperymencie 1 badane było zachowanie się ZSAE dla: $p_k = 0.5, 0.7$ oraz 0.9 dla $p_z = 0.5\%$. Zestawienie wszystkich testów parametru p_k zamieszczono w tabeli 3.



Rys. 2. Widok głównego okna GUI programu ZSAE. Oznaczenia w tekście. Źródło: [6]

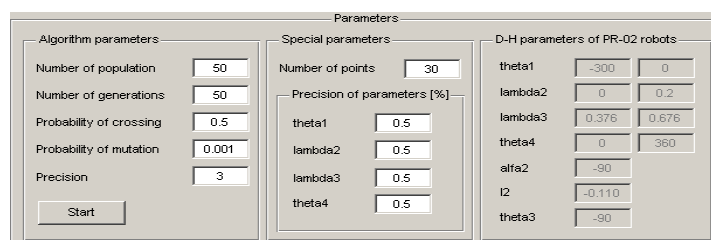
Rys. 3. Widok sekcji *Parameters* programu ZSAE. Oznaczenia w tekście. Źródło [6]

Tabela 3. Zestawienie wyników testu parametru PK

Wartość parametru PK	Nr testu	Wynik [m]	Średnia [m]
0.5	1	2.77113	2.77192
	2	2.77276	
	3	2.77187	
0.7	1	2.77031	2.77097
	2	2.77121	
	3	2.77140	
0.9	1	2.77110	2.77126
	2	2.77099	
	3	2.77169	

W eksperymencie 2 badane było p_m , które w kolejnych testach wynosiło: 0.001, 0.005, 0.01 dla $p_k = 0.7$ i dokładności parametrów PP 0.5%. Zestawienie wszystkich testów parametru prawdopodobieństwa mutacji¹ zostało przedstawione w tabeli 4.

¹ Zadaniem mutacji jest wprowadzanie różnorodności w populacji, co zapobiega przedwczesnej zbieżności algorytmu. Zatem niska wartość tego parametru może doprowadzić do małej różnorodności populacji, co zmniejszy prawdopodobieństwo odnalezienia lepszego wyniku. Taka sytuacja wystąpiła w teście PM wynoszącym 0.001, gdzie w dwóch przypadkach zostały wyszukane wartości zbliżone do wyniku pierwotnego. Odwrotna sytuacja występuje dla zbyt dużej wartości prawdopodobieństwa mutacji. Można to dostrzec w teście, gdzie PM

Tabela 4. Zestawienie wyników testu parametru PM

Wartość parametru PM	Nr testu	Wynik [m]	Średnia [m]
0.001	1	2.77166	2.77077
	2	2.76924	
	3	2.77140	
0.005	1	2.77087	2.77011
	2	2.77066	
	3	2.76879	
0.01	1	2.76967	2.77106
	2	2.77215	
	3	2.77136	

W eksperymencie 3 badany był parametr precyzji zmiennych ($p_z = 1\%$, 0.5% oraz 0.3%). Definiuje on odległość od punktu pierwotnego w jakiej będą losowane kolejne wartości osobników. Ustalono ponadto: $p_k = 0.7$, $p_m = 0.005$. Zestawienie wszystkich testów parametru precyzji zostało przedstawione w tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie wyników testu parametru PP

Wartość parametru PP	Nr testu	Wynik [m]	Średnia [m]
1	1	2.77165	2.77140
	2	2.77251	
	3	2.77004	
0.5	1	2.76879	2.77007
	2	2.77039	
	3	2.77102	
0.3	1	2.77138	2.77157
	2	2.77227	
	3	2.77106	

Im wyższy parametr precyzji tym losowanie wartości osobników następuje z większego zakresu. Jeśli zakres ten jest zbyt duży to wyniki poszczególnych punktów trajektorii jest bardziej rozrzucony w przestrzeni. Zbyt mały parametr precyzji natomiast powoduje, że wartości osobników są zbyt zwarte i powtarzają się. Optymalnym parametrem dla następnych testów okazał się $p_z = 0.5$, dla którego średnia długość trajektorii wynosiła 2.77007.

wynosi 0.01, a rezultatem są bardzo zróżnicowane wyniki. Do następnych testów został wybrany parametr PM wynoszący 0.005, dla którego średnia długość przebiegu trajektorii była najkrótsza (2.77011 m).

W eksperymencie 4 badany był parametr liczby generacji ($l_g = 50, 70$ oraz 90), który miał wpływ na liczbę iteracji wykonania cyklu AG. Przyjęto ponadto $p_k = 0.7$, $p_m = 0.005$ oraz $p_z = 0.5\%$. Wyniki długości obliczonych trajektorii w poszczególnych testach parametru l_g zostały zamieszczone w tabeli 6.

Tabela 6. Zestawienie wyników testu parametru NG

Wartość parametru NG	Nr testu	Wynik [m]	Średnia [m]
50	1	2.77224	2.77129
	2	2.76829	
	3	2.77334	
70	1	2.76791	2.76882
	2	2.76726	
	3	2.77128	
90	1	2.76974	2.77065
	2	2.77245	
	3	2.76975	

Parametr l_g ma duży wpływ na wyszukiwanie polepszenia rozwiązania, ponieważ im jest większy tym wynik jest dłużej poddawany cyklom algorytmu. Ze względu na bardzo dobre wyniki testu nr 2 do następnych testów parametr $l_g = 70$.

W eksperymencie 5 badany był parametr wielkości populacji (l_p) mający wpływ na liczbę osobników, a zatem na średnią odległość osobników do kolejnych punktów trajektorii, co ma z kolei wpływ na FP. W kolejnych testach parametr ten ustawiony był na 30, 50 oraz 70 dla $p_k = 0.7$, $p_m = 0.005$ oraz dla $p_z = 0.5\%$. Zestawienie wszystkich testów parametru wielkości populacji zostało przedstawione w tabeli 7.

Tabela 7. Zestawienie wyników testu parametru NP

Wartość parametru NP	Nr testu	Wynik [m]	Średnia [m]
30	1	2.77072	2.77097
	2	2.77093	
	3	2.77127	
50	1	2.77137	2.76907
	2	2.76581	
	3	2.77004	
70	1	2.76873	2.77011
	2	2.77016	
	3	2.77145	

Podsumowując wyniki testu wielkości populacji można zauważyć, że najlepsze wyniki wystąpiły dla testu nr 2. Wielkość populacji przy równomiernym rozłożeniu wyników losowania wartości dla osobników nie ma znaczenia. Jednakże w życiu codziennym losowanie ma tendencje do losowego wyboru tych samych, bądź okolicznych wartości, co oznacza, że losowanie może nie być równomierne. Aby temu zapobiec zwiększa się liczbę losowanych wartości. Jednakże w przypadku optymalizacji ZSAE zbyt duża wielkość populacji spowolniała jego działanie. Z tego względu do następnych testów został wybrany parametr wielkości populacji wynoszący 50. Zatem jako najlepsze przyjęto parametry: $l_p = 50$, $l_g = 70$, $p_k = 0.7$, $p_m = 0.005$, $l_p = 30$, $p_z = 0.5$. Dalszy test polegał na dziesięciokrotnym uruchomieniu programu ZSAE dla tego zestawu parametrów i analizie uzyskanych wyników. Wyniki poszczególnych uruchomień algorytmu zamieszczono w tabeli 8.

Tabela 8. Wyniki testu głównego

Nr testu	Wynik [m]
1	2.77161
2	2.77139
3	2.77199
4	2.77265
5	2.76877
6	2.77197
7	2.77113
8	2.77087
9	2.77140
10	2.77095
Średnia	2.77127

Tylko w jednym przypadku na zbadanych dziesięć (10%) została wyliczona trajektoria dłuższa od trajektorii pierwotnej. Ma to miejsce w teście nr 4, gdzie trajektoria ta jest dłuższa od trajektorii pierwotnej o 0.5 mm. W pozostałych testach obliczona trajektoria jest krótsza od trajektorii pierwotnej. W najlepszym wypadku (test nr 5) trajektoria ta jest krótsza o niecałe 3.5 mm. Średnia wartość długości trajektorii to 2.77127 m.

5. WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Przeprowadzone badania pokazują, że na działanie ZSAE ma wpływ każdy parametr. Można wyróżnić przy tym parametry, które mają wpływ na czas działania programu na wynik działania. Na wynik działania programu ZSAE mają parametry precyzji wyszukiwanych osobników oraz prawdopodobieństwo

krzyżowania i mutacji, a także chociaż w mniejszym stopniu parametr generacji. Parametr generacji obok parametru wielkości populacji ma zasadniczy wpływ na czas obliczenia trajektorii. Przeprowadzone eksperymenty dotyczyły przebiegu jednej trajektorii na podstawie 30 punktów i wykazały, że możliwe jest odnajdywanie krótszych czasów ruchu robota PR-02 oraz poprawianie aktualnych trajektorii za pomocą ZSAE.

Do udoskonalenia aktualnego ruchu może posłużyć wprowadzenie zmian do samego sposobu implementacji ZSAE. Można zmienić sposób generacji PP na losowanie jej według rozkładu Gaussa, tak aby wartością oczekiwaną była wartość punktu pierwotnego. Dzięki temu już początkowa populacja zbliżona jest do punktu pierwotnego, a zatem rozwiązanie zostanie wyszukane szybciej. W literaturze przedmiotu na ogół proponuje się losowy dobór populacji początkowej osobników. Takie rozwiązanie sprzyja szybkiej ocenie możliwie dużej liczby potencjalnych rozwiązań. W omawianym zastosowaniu ZSAE FP jest uśredniana według odległości poszczególnych punktów, na które wskazują osobniki do punktu pierwotnego. Zatem wartości poszczególnych osobników są dopasowywane tak, by wskazywały na punkty najbliższe punktu pierwotnego. Dlatego też bardziej wskazane jest zastosowanie rozkładu normalnego, co skutkuje zawężeniem pola losowanej populacji.

Kolejną modyfikacją może być częściowa lub całkowita zmiana funkcji przystosowania. Aktualna wartość funkcji przystosowania jest największa dla osobników leżących najbliższej średniej odległości punktów do punktu pierwotnego. Do lepszej poprawy trajektorii należałoby uwzględnić w funkcji przystosowania odległość od punktu docelowego. Przy tym należy uważać, bo przy takim założeniu trajektoria będzie dążyła do linii prostej i może przecinać omijany obiekt w ruchu pierwotnym, co może skutkować kolizją. W takim wypadku należałoby również uwzględnić ten obiekt w ZSAE.

LITERATURA

- [1] Ashlock D.A., Manikas T.W., Ashenayi K.: Evolving a Diverse Collection Robot Path Planning Problems. *Evolutionary Computation*, s. 1837-1844, IEEE Congress on Evolutionary Computation, Vancouver 2006.
- [2] Buratowski T.: Zastosowanie Robotyki w Przemysle. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki i Mechatroniki, Kraków 2010.
- [3] Hejmo W. [pod red.]: Sterowanie robotami i manipulatorami przemysłowymi: modele i metody matematyczne. WPK, Kraków 1997.
- [4] Honczarenko J.: Roboty przemysłowe: Budowa i zastosowanie. WNT, Warszawa 2004.
- [5] Kaczorek T.: Wektory i macierze w automatyce i elektrotechnice. WNT, Warszawa 1998.

- [6] Lewandowski P.: Model i implementacja systemowego algorytmu ewolucyjnego w środowisku MATLABA i Simulinka do poprawy modeli systemów fizycznych. Praca magisterska napisana w Katedrze Sztucznej Inteligencji na Wydziale Nauk Ścisłych pod kierunkiem dr inż. Jerzego Tchórzewskiego. UPH. Siedlce 2013.
- [7] Michalewicz Z: Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne. WNT, Warszawa 1999.
- [8] Morecki A., Knapczyk J.: Podstawy Robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów. WNT, Warszawa 1993.
- [9] Szkodny T.: Modele matematyczne ruchu manipulatorów robotów przemysłowych na potrzeby sterowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Z. N. s. Automatyka, nr. 112, Gliwice 1993.
- [10] Tadeusiewicz R.: Systemy wizyjne robotów przemysłowych. WNT, Warszawa 1992.
- [11] Tchórzewski J.: Systemowy algorytm ewolucyjny. Materiały Konferencji pn. „Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna”. UJ. Kraków 2005.

SYSTEMIC EVOLUTIONARY ALGORITHM TO IMPROVE PERFORMANCE OF INDUSTRIAL ROBOT PR-02

The paper presents results of research on the use of Systemic Evolutionary Algorithm (SAE) to improve the traffic model of an industrial robot PR-02 in the MATLAB and Simulink environment. The improvement applies to conduct that outlines the trajectory of the end of the robot arm for a given starting point and end point. In order to implement the above. the task: SAE algorithm modified to suit the conditions of the robot motion PR-02, and then implemented in MATLAB environment as an integrated algorithm SAE (ZSAE). Also conducted simulation experiments suitable for testing the sensitivity of robot motion PR-02 to change the parameters of the model.