



Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego

Organizacja IX Konferencji Modelowanie Matematyczne  
w Fizyce i Technice (MMFT 2017)

- zadanie finansowane w ramach umowy 829/P-DUN/2017  
ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych  
na działalność upowszechniającą naukę.



# ZASTOSOWANIE METOD PRZETWARZANIA I ANALIZY OBRAZU W OPTYMALIZACJI RÓWNAŃ RUCHU CZTERONOŻNEGO ROBOTA KROCZĄCEGO

Katarzyna Gospodarek

*Instytut Informatyki Teoretycznej i stosowanej,  
Politechnika Częstochowska*

# PLAN PREZENTACJI

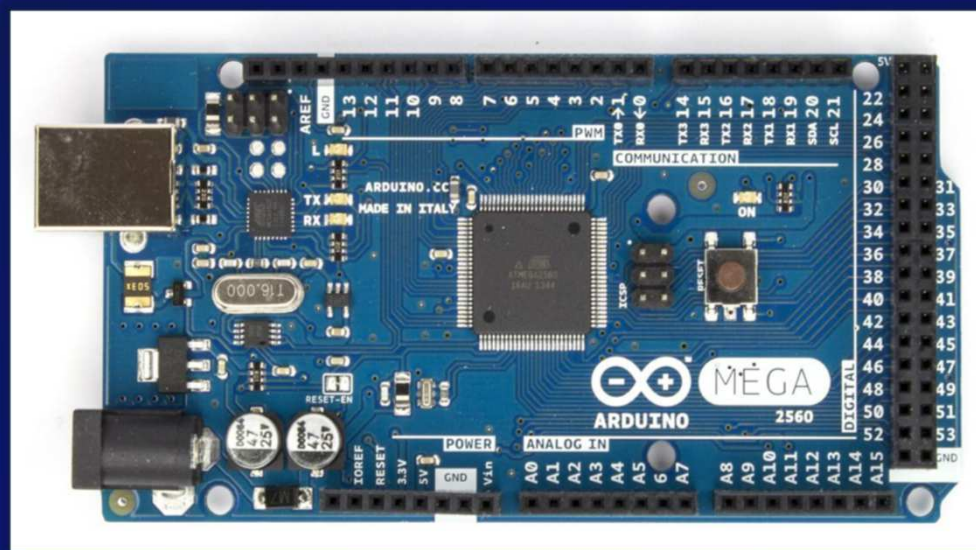
- Opis konstrukcji wykorzystywanego stanowiska badawczego.
- Związek pomiędzy generowaniem ruchu maszyny kroczącej i zagadnieniami związanymi z kinematyką układu.
- Metody analizy i przetwarzania obrazów wykorzystane do identyfikacji położenia kluczowych punktów konstrukcji.
- Struktura zaimplementowanego oprogramowania.
- Prezentacja wyników przeprowadzonych analiz.

# WYKORZYSTYWANY UKŁAD ROBOTYCZNY



- Jest to rzeczywisty prototyp prostego robota czteronożnego (ang. quadruped robot).
- Zastosowane pary kinematyczne należą do V klasy co oznacza, że charakteryzuje je jeden stopień swobody.
- W stawach biodrowym i kolanowym zastosowano przeguby obrotowe.

# PODSTAWOWE ELEMENTY KONSTRUKCJI



ARDUINO MEGA 2560, ŹRÓDŁO [W1]

- Jako układ sterujący wykorzystywana jest płytka developerska oparta o mikrokontroler ATmega 2560. Posiada ona w sumie 54 wejść/wyjść cyfrowych, z czego 14 może pracować w trybie PWM oraz 16 wejść analogowych.
- Dostępna pamięć to 256 KB pamięci Flash, która może zostać wykorzystywana przez programy i 8 KB pamięci RAM.
- Procesor pracuje z prędkością 16 MHz czyli cykl wykonywany jest co 62.5 ns.

# PODSTAWOWE ELEMENTY KONSTRUKCJI



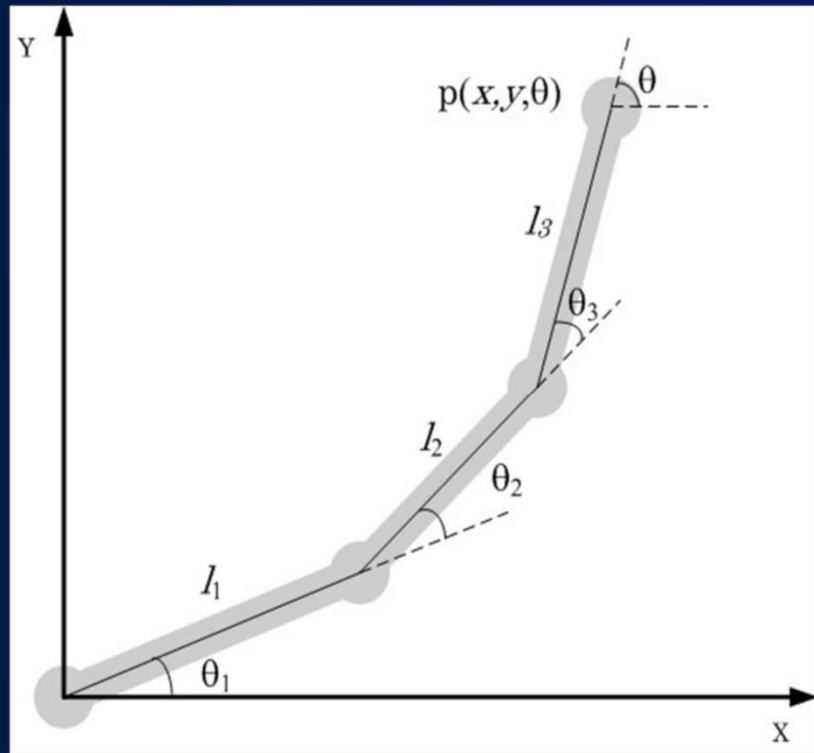
Podstawowe parametry:

- Prędkość 0,15s/60°.
- Moment: 1,8 kg\*cm (4,8V), 2,2 kg\*cm (6,6V).
- Wymiary: 22,8 x 12,2 x 28,5 mm.
- Masa: 13,4g.
- Napięcie zasilania: 4,8V~6,6V.

SERWO TOWERPRO MG90S, ŹRÓDŁO [W2]

- Budowa serwomechanizmu opiera się o zwykły silnik prądu stałego z dodatkowymi przekładniami oraz układem sterującym.
- Układ sterujący ustawia wał w zależności od długości impulsu na linii sterującej próbkowanego co 20 ms.
- W większości przypadków wał serwomechanizmu może przyjmować pozycje kątowe z zakresu 0-180 stopni.

# KINEMATYKA



- Podczas pracy nad algorytmem odpowiadającym za ruch jakiegokolwiek układu robotycznego, podstawowym elementem pracy są zagadnienia związane z kinematyką danego układu.
- W przypadku generowania ruchu wykorzystywane jest zarówno proste jak i odwrotne zadanie kinematyki.

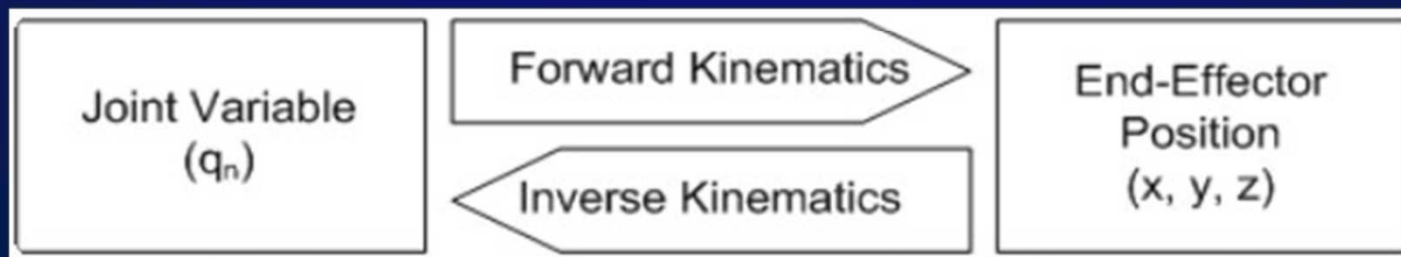
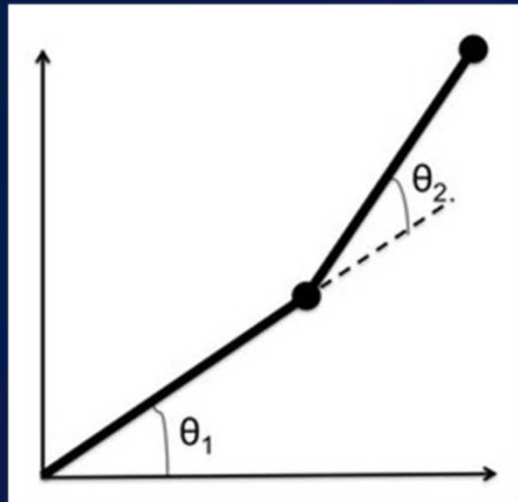
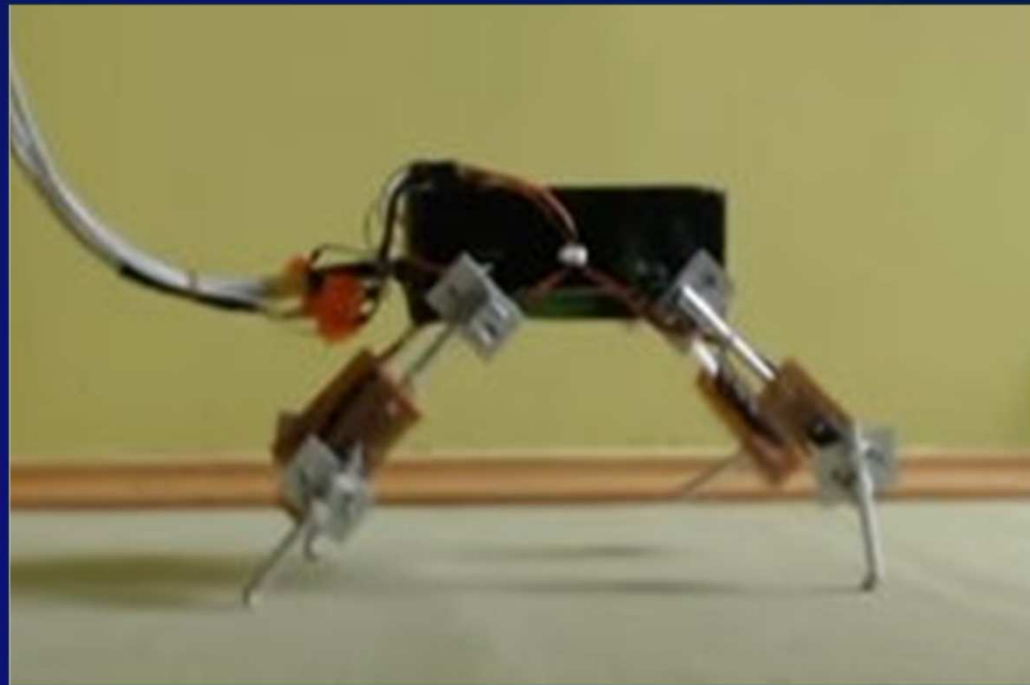


DIAGRAM ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY PROSTYM I ODWROTNYM ZADANIEM KINEMATYKI [W4].

# KINEMATYKA



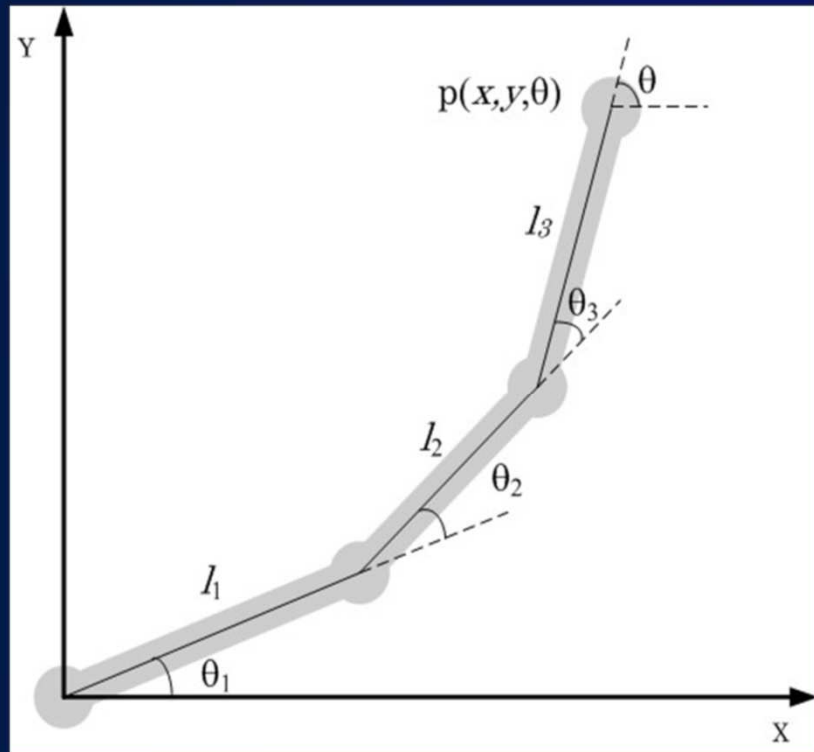
SCHEMAT MANIPULATORA  
PODWÓJNE WACHADŁO



- Kinematyka analizowanej konstrukcji, ze względu na podobieństwo budowy, może być rozpatrywana w podstawowym zakresie w sposób charakterystyczny dla manipulatorów.

- Schemat konstrukcji nogi wykorzystywanego układu robotycznego jest zgodny ze schematem konstrukcji bardzo prostego manipulatora typu – podwójne wahadło, zbudowanego z dwóch ramion i dwóch przegubów obrotowych.

# KINEMATYKA



- Prostym (bezpośrednim) zadaniem kinematyki nazywane jest zadanie polegające na odnalezieniu zależności położenia i orientacji efektora manipulatora od konfiguracji jego przegubów.
- Powszechnym w robotyce sposobem reprezentacji kinematyki manipulatorów jest notacja DH (notacja Denavita i Hartenberga).

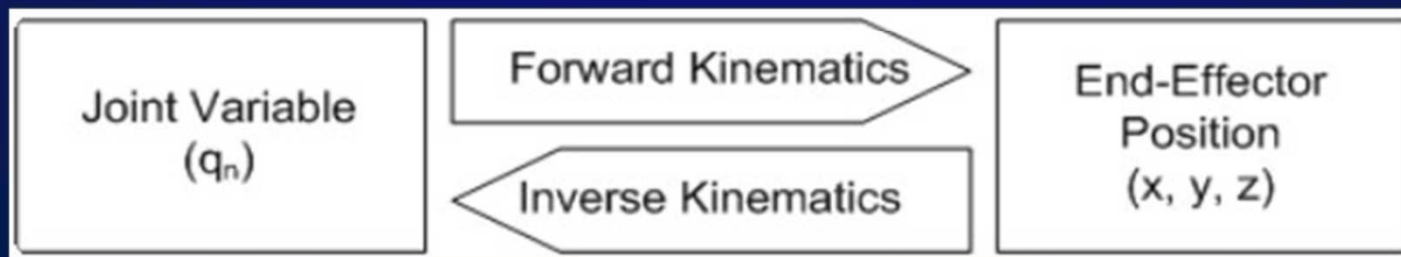
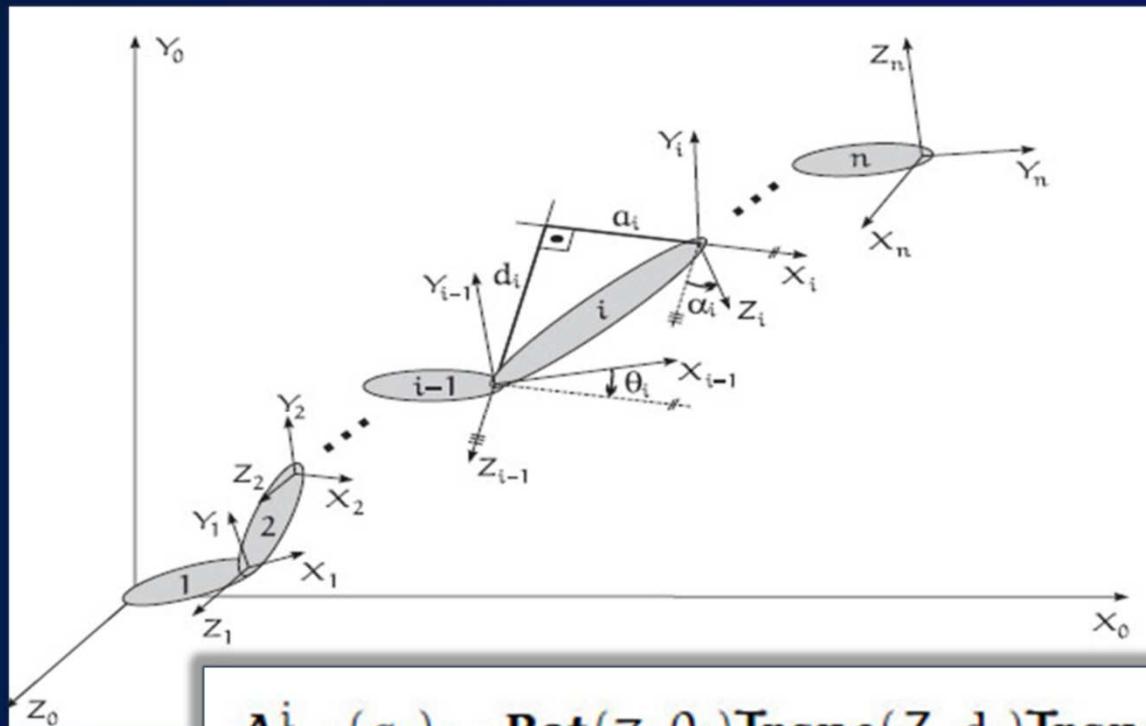


DIAGRAM ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY PROSTYM I ODWROTNYM ZADANIEM KINEMATYKI [W3].



# PROSTE ZADANIE KINEMATYKI



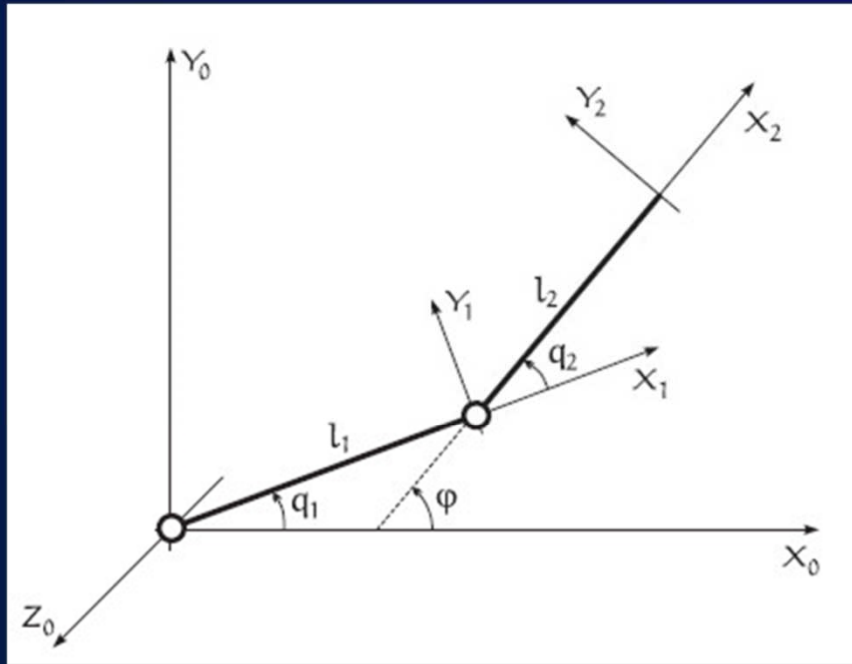
Transformacja układu nr  $i-1$  w układ o nr  $i$  opisywana jest przy pomocy złożenia elementarnych obrotów i przesunięć [2].

$$A_{i-1}^i(q_i) = \text{Rot}(Z, \theta_i) \text{Trans}(Z, d_i) \text{Trans}(X, a_i) \text{Rot}(X, \alpha_i)$$

- Zaproponowany przez Denavita i Hartenberga algorytm wyznaczania kinematyki polega na związaniu z każdym przegubem lokalnego układu współrzędnych i prowadzi do wyliczenia kinematyki manipulatora jako złożenia tych transformacji.

# DEFINICJA KINEMATYKI MANIPULATORA

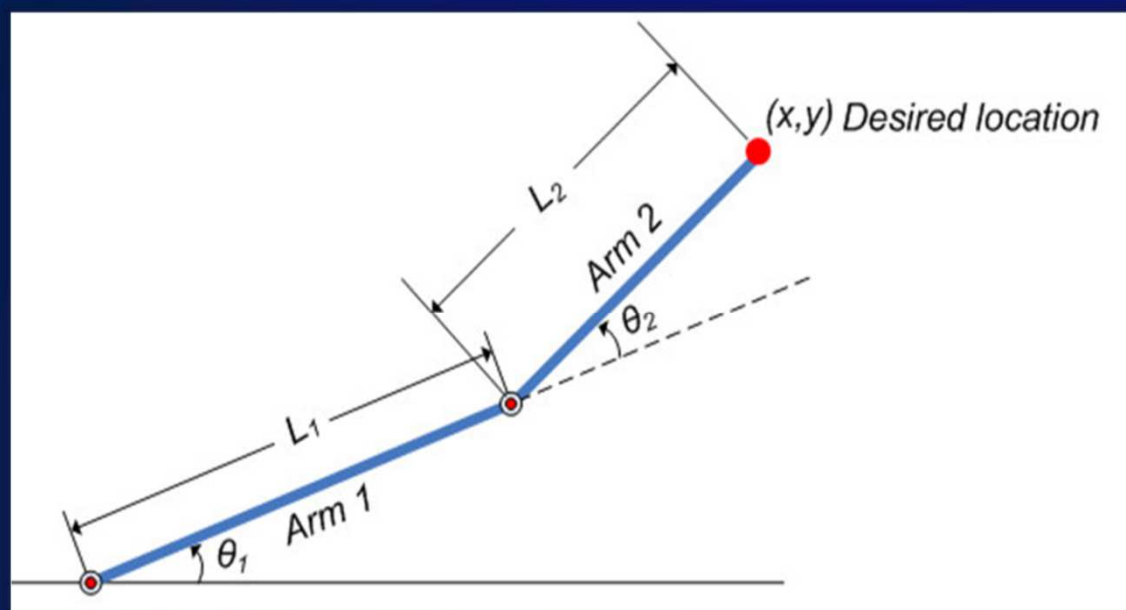
$$\mathbf{K}(\mathbf{q}) = \mathbf{A}_0^1(q_1)\mathbf{A}_1^2(q_2) : X_0Y_0Z_0 \mapsto X_2Y_2Z_2,$$



$$\mathbf{K}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_1c_1 + l_2c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_1s_1 + l_2s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Definicja kinematyki manipulatora typu podwójne wahadło według notacji DH, przy oznaczeniach  $s_{12} = \sin(q_1+q_2)$  i  $c_{12} = \cos(q_1+q_2)$  [2].

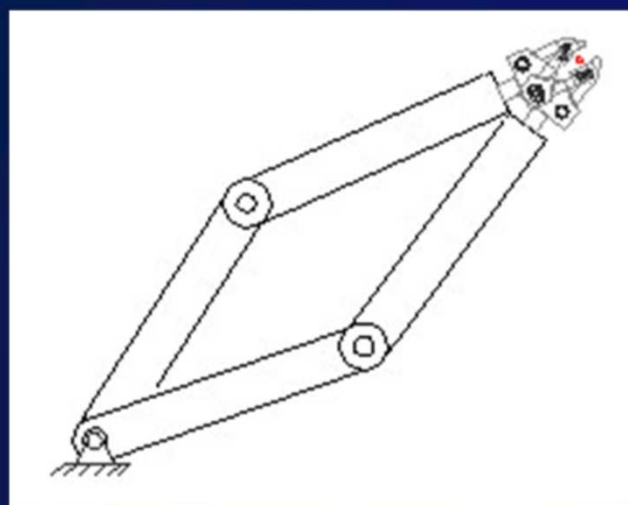
# ODWROTNE ZADANIE KINEMATYKI



Schemat manipulatora dwuczłonowego, Źródło [W3].

- Z punktu widzenia sterowania manipulatora ważniejszym zagadnieniem jest zadanie polegające na odnalezieniu zależności odwrotnej do tej wyznaczonej w prostym zadaniu kinematyki.
- Czyli wyznaczenie takiej konfiguracji przegubów , która zapewni osiągnięcie przez efektor zadanego położenia.

# ODWROTNE ZADANIE KINEMATYKI



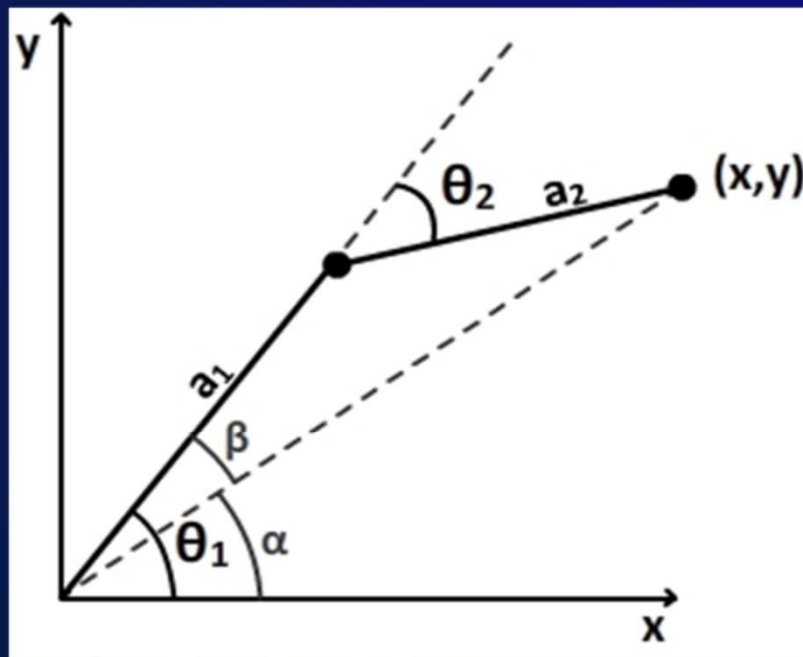
Przykład – gdy zadane współrzędne mieszczą się w zasięgu manipulatora, mogą istnieć dwa rozwiązania.

OSOBLIWE ROZWIĄZANIE ODWROTNEGO ZADANIA KINEMATYKI, Źródło [2].

- Rozwiązanie odwrotnego zadania kinematyki można uzyskać na wiele różnych sposobów.
- Jednym z nich jest bezpośrednio podejście algebraiczne, polegające na formalnym przekształceniu równań kinematyki manipulatora. Ze względu na nieliniowość tych równań oraz zazwyczaj nieuniknioną niejednoznaczność rozwiązań jest to zadanie dość trudne [2].

# ODWROTNE ZADANIE KINEMATYKI

- Przykładem odmiennego podejścia jest podejście geometryczne. Cechę wyróżniającą ten sposób rozwiązania odwrotnego zadania kinematyki stanowi dekompozycja przestrzeni geometrii manipulatora na szereg figur geometrii płaskiej [2].



WYZNACZENIE PIERWSZEJ WSPÓŁRZĘDNEJ PRZEGUBOWEJ (KĄTA  $\vartheta_1$ ) – METODA GEOMETRYCZNA WYKORZYSTANIE PRAWA SINUSÓW, Źródło [2].

$$\frac{\sin(\beta)}{a_2} = \frac{\sin(180^\circ - \theta_2)}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$\sin(180^\circ - \theta_2) = \sin(\theta_2)$$

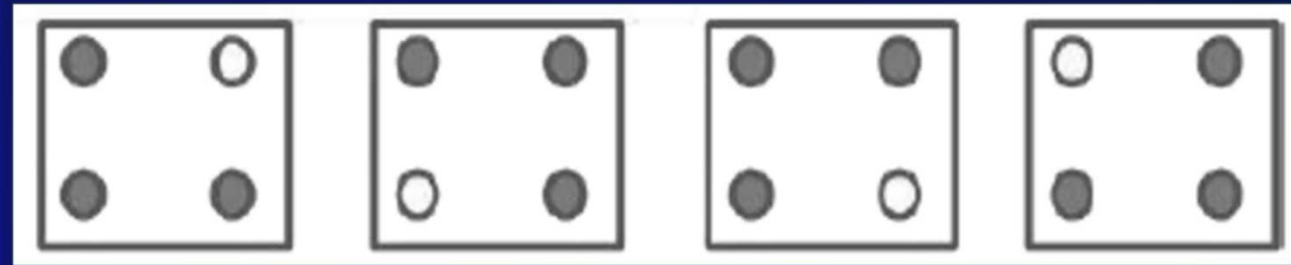
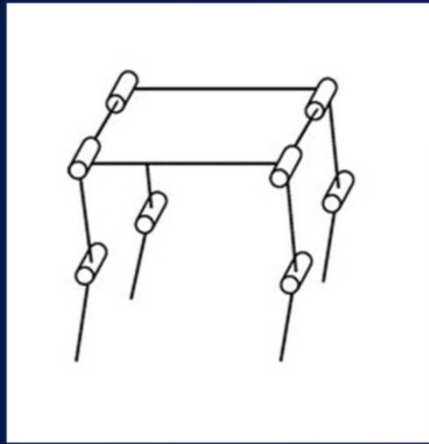
$$\frac{\sin(\beta)}{a_2} = \frac{\sin(\theta_2)}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$\sin(\beta) = \frac{a_2 \sin(\theta_2)}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{a_2 \sin(\theta_2)}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

$$\theta_1 = \beta + \alpha$$

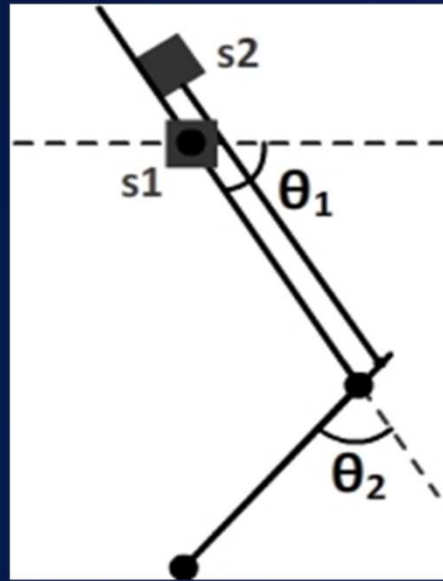
# PROCES GENERACJI CHODU MASZyny KROCZĄCEJ



WZORZEC RUCHU DLA CZTERONOŻNEGO PEŁZANIA

- Proces generacji chodu maszyny kroczącej jest zawsze ściśle powiązany z jej typem.
- W zależności od ilości kończyn i rodzaju chodu dobierane są parametry umożliwiające jej odpowiednie przemieszczanie.
- W przypadku prostych konstrukcji kroczących podstawowym analizowanym typem chodu jest pełzanie określane także jako chód mechatroniczny.

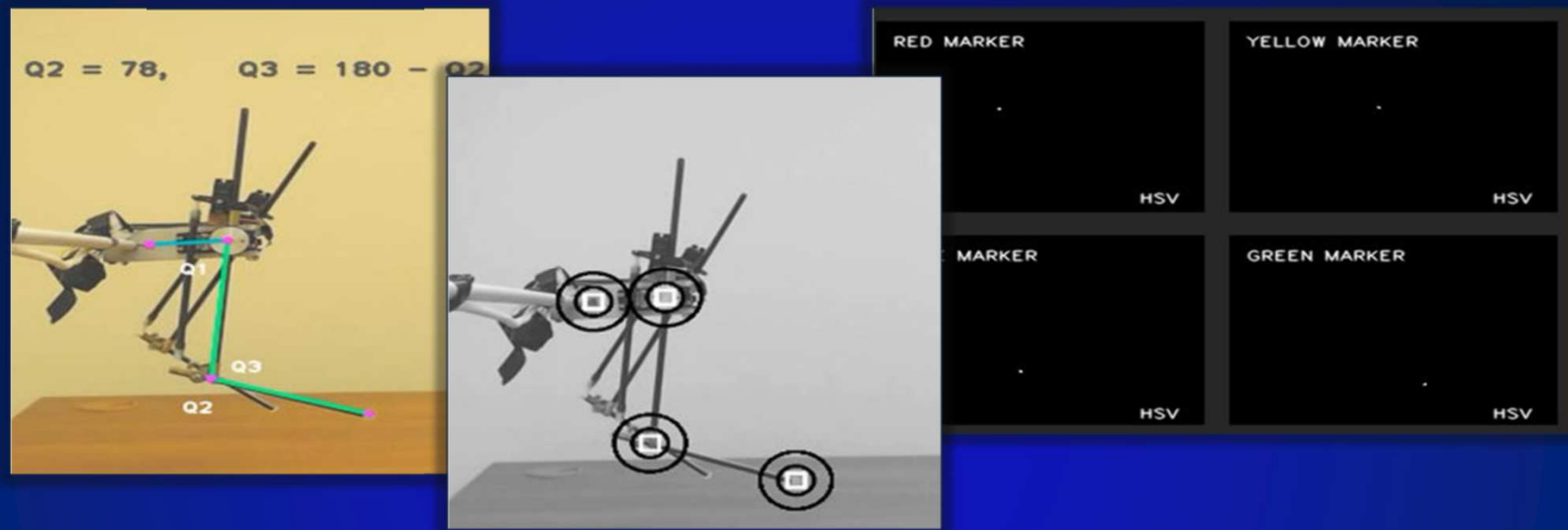
# CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA PROCES GENERACJI CHODU



PRZYKŁADOWA KONSTRUKCJA KOŃCZYNY ROBOTA, W ANALIZOWANYM PRZYPADKU JEDEN Z NAPĘDÓW URZĄDZENIA (S1) JEST BEZPOŚREDNIO POŁĄCZONY ZE STAWEM, NATOMIAST POŁĄCZENIE DRUGIEGO (S2) JEST BARDZIEJ SKOMPLIKOWNE.

- Podczas integracji oprogramowania odpowiadającego za generowanie chodu z rzeczywistym modelem robota często ujawnia się jak duży wpływ na ten proces mają czynniki takie jak : niedoskonałości układu czy też zastosowane rozwiązania konstrukcyjne.
- Bardzo istotnym elementem jest geometria zastosowanych kończyn, a w szczególności sposób powiązania napędów ze stopniami swobody [1].

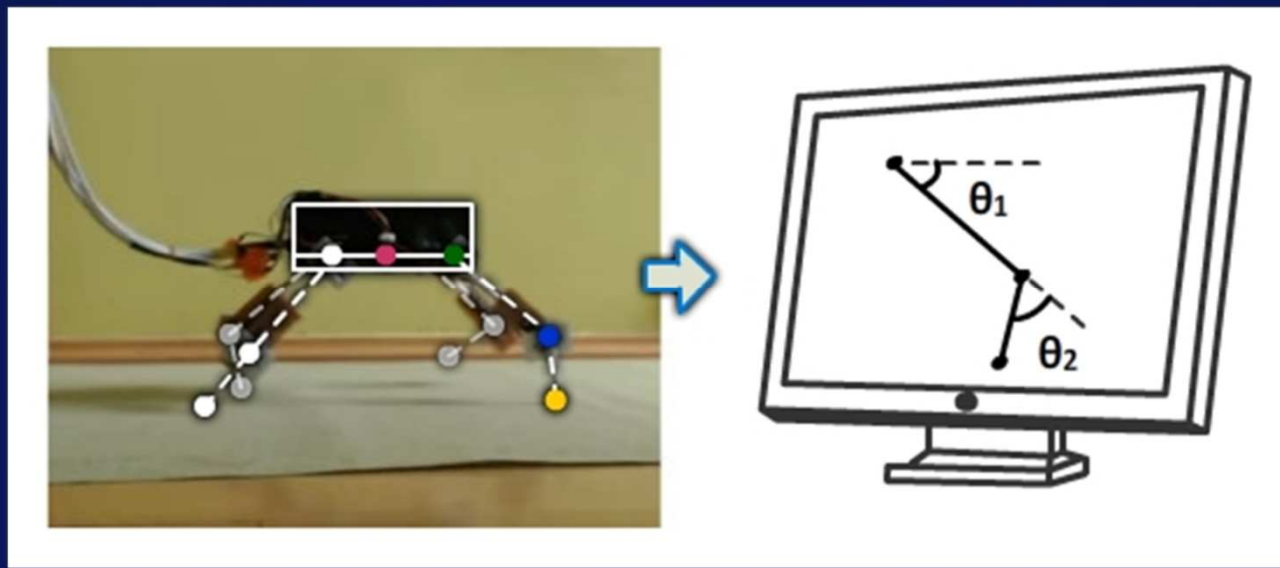
# WYKORZYSTANIE METOD ANALIZY I PRZETWARZANIA OBRAZU



- W celu eliminacji wpływu tego rodzaju czynników na proces generowania chodu dla testowanej konstrukcji robota zdecydowano się na wprowadzenie dodatkowych elementów programowych.
- Do identyfikacji parametrów ruchu oraz pojawiających się podczas niego nieprawidłowości wykorzystano metody i algorytmy udostępnione przez bibliotekę wizyjną OpenCV.

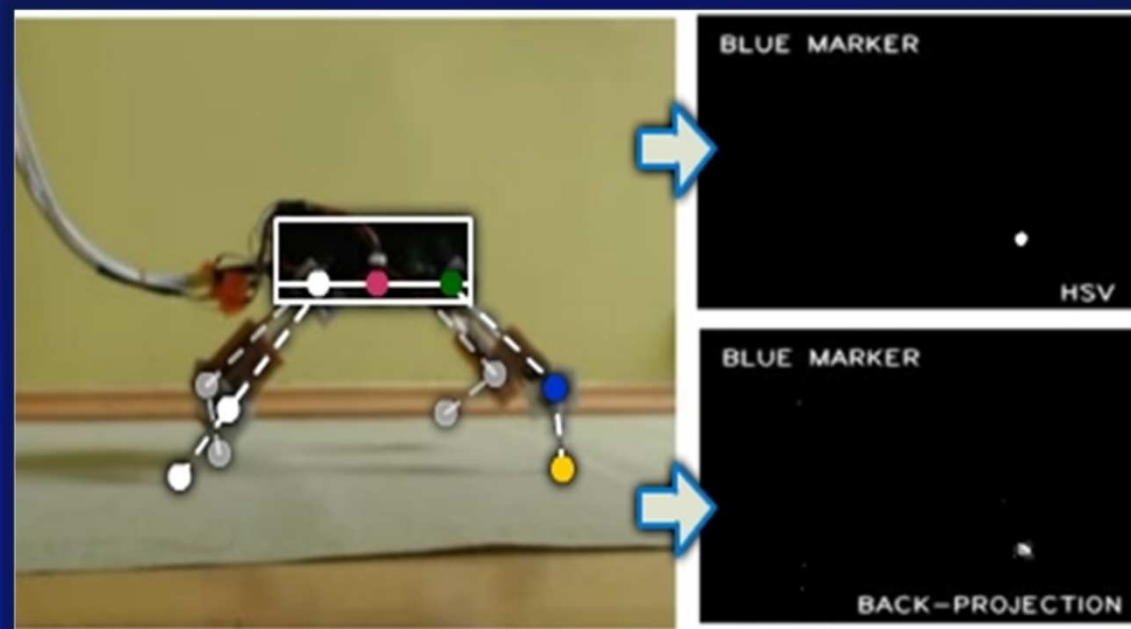


# WYKORZYSTANIE METOD ANALIZY I PRZETWARZANIA OBRAZU



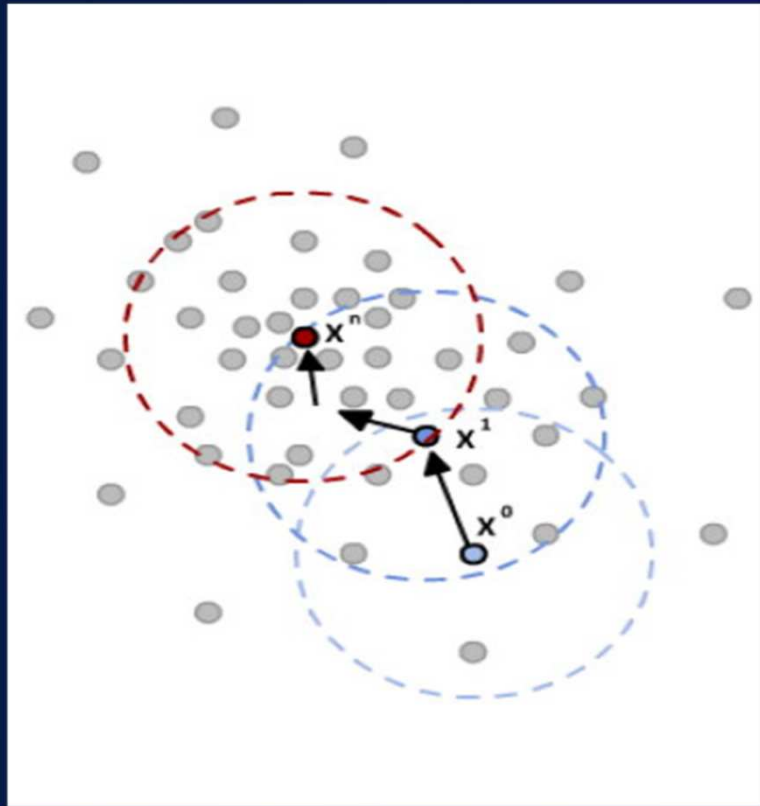
- Zaimplementowane rozwiązanie pozwala m.in. na porównanie wartości kątów zadawanych przez oprogramowanie sterujące ruchem kończyny, z wartościami rzeczywistymi, osiąganymi przez testowane przeguby.
- Pomiary wartości rzeczywistych dokonywane są na podstawie analizy przechwyconej sekwencji wideo zawierającej określony ruch testowanej konstrukcji.

# ANALIZA WIZYJNA



- Podczas analiz skupiono się przede wszystkim na śledzeniu położenia kluczowych punktów konstrukcji podczas zadawanego ruchu oraz wykorzystanie pozyskanych danych w celu wprowadzenia odpowiednich współczynników korekcyjnych.
- W celu uproszczenia procesu identyfikacji wybranych punktów konstrukcji, każdy z nich został opatrzony dodatkowym znacznikiem o unikalnym kolorze.

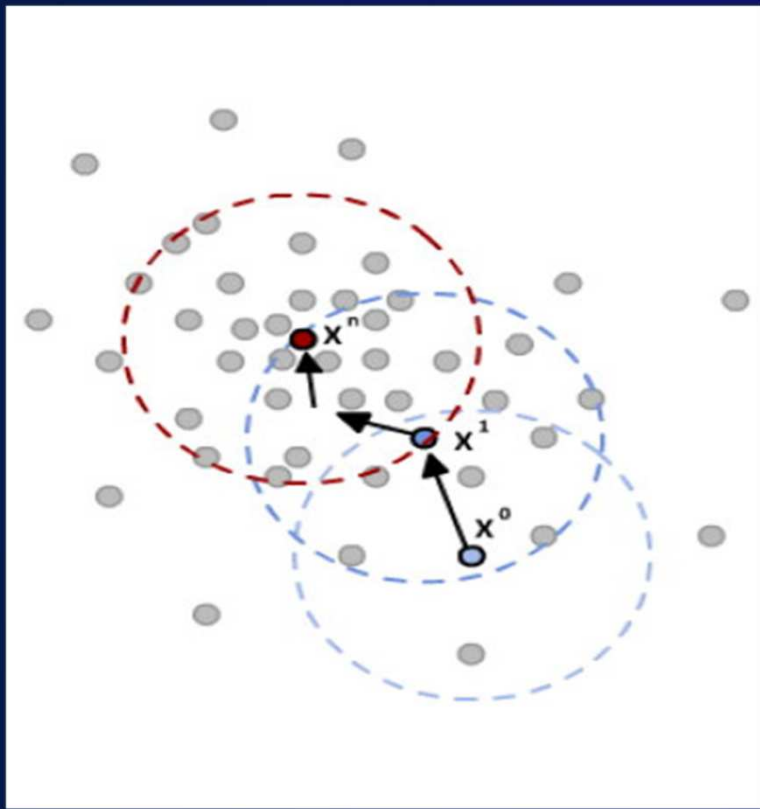
# ALGORYTM CAMSHIFT



PROCEDURA ALGORYTMU MEANSHIFT

- W trakcie pracy nad implementacją zdecydowano się na zastosowanie algorytmu CAMShift (Continuously Adaptive MeanShift) jako metody odpowiedzialnej za śledzenie przemieszczeń obiektów, co po części wstępnie zdeterminowało sposób ich detekcji.
- Zastosowany algorytm bazuje na odszukiwaniu lokalnego ekstremum w rozkładzie gęstości zbioru danych, z tego względu jako cechę umożliwiającą detekcję zastosowano kolor obiektu, a dokładniej jego histogram [3,4].
- Dokładny teoretyczny opis algorytmu oraz zastosowanych w nim zależności matematycznych został wyczerpująco objaśniony w bardzo wielu publikacjach ([3, 4, 5, 6]).

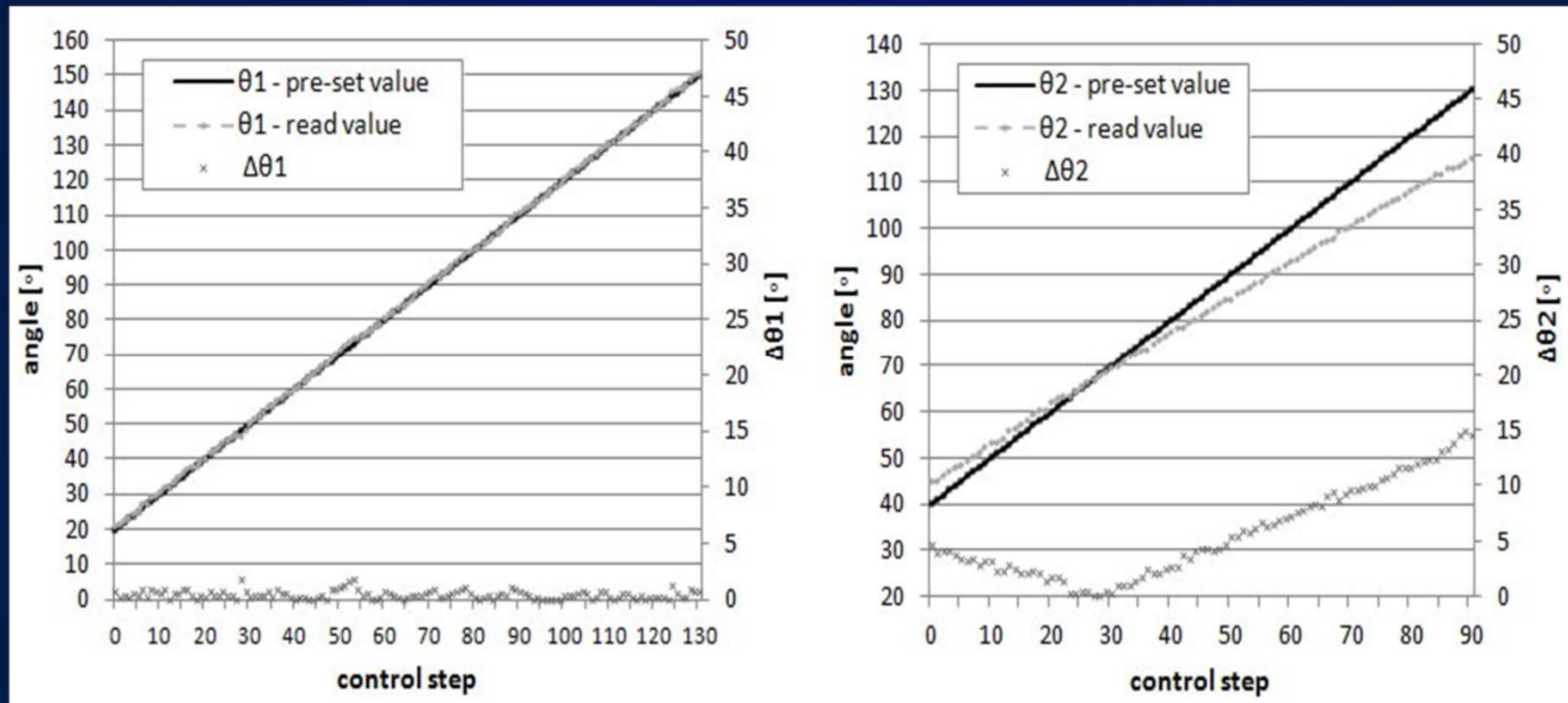
# ALGORYTM CAMSHIFT



PROCEDURA ALGORYTMU MEANSHIFT

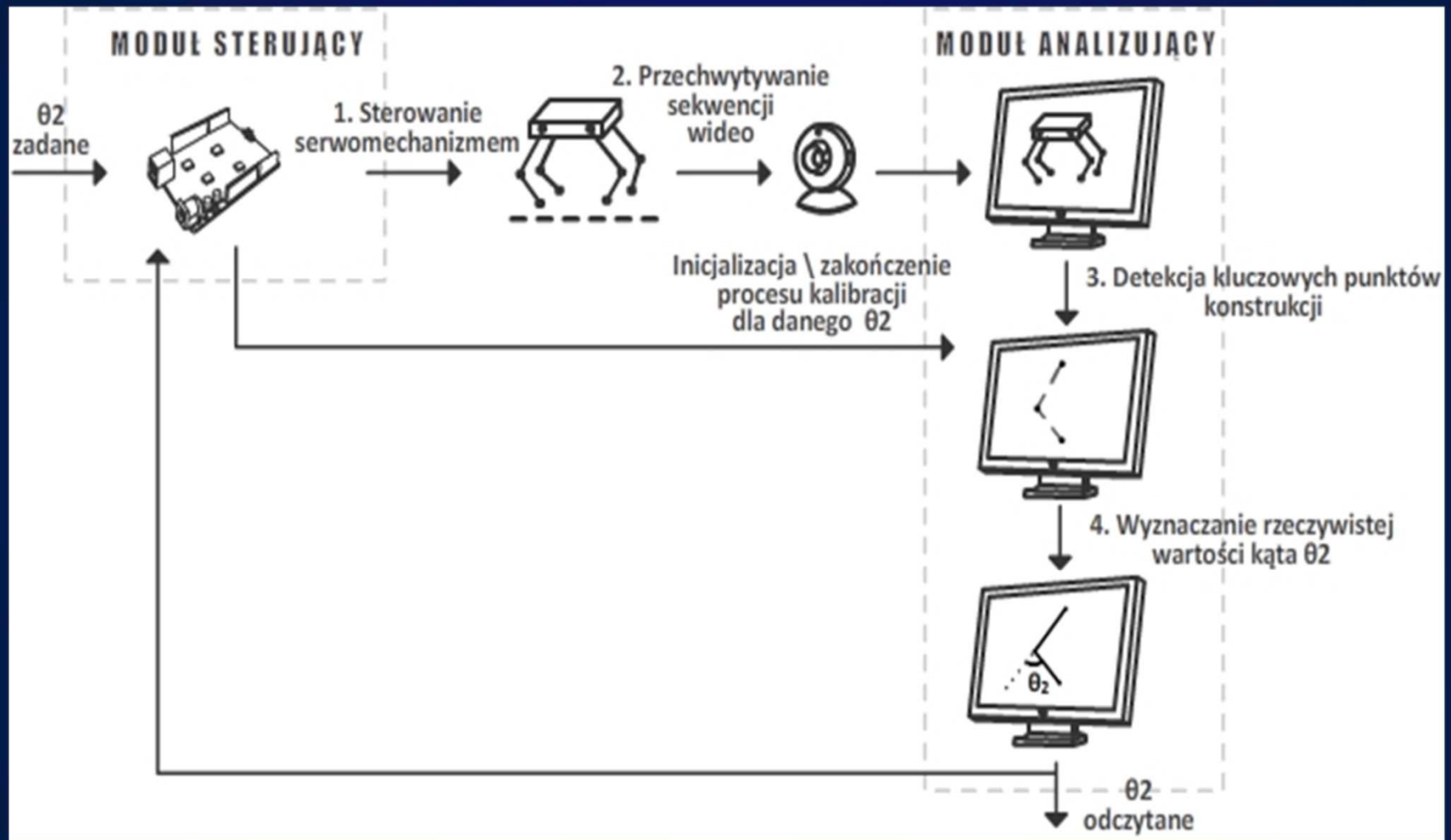
- Aby zastosowanie omawianego algorytmu było możliwe, przetwarzany obraz wideo musiał zostać poddany odpowiedniej obróbce.
- Zastosowano m.in.: konwersję do przestrzeni HSV, binaryzację z podwójnym progiem, przekształcenia morfologiczne, przygotowanie histogramu dla każdego ze znaczników oraz wykonanie na jego podstawie wstecznej projekcji.

# WERYFIKACJA POPRAWNOŚCI KĄTÓW UZYSKANYCH PRZEZ STAWY ROBOTA



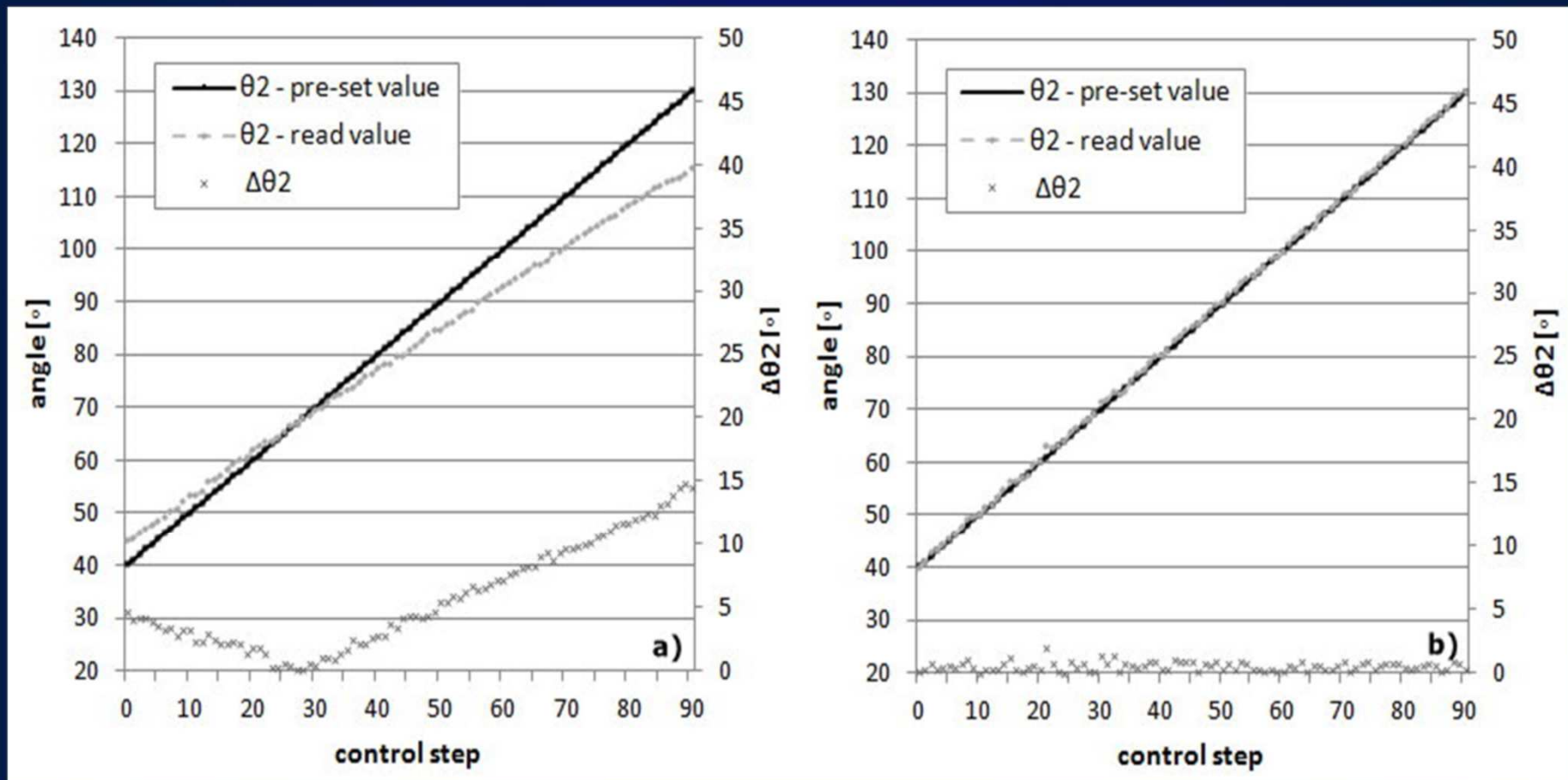
- Wykresy przedstawione powyżej powstały na podstawie danych uzyskanych podczas jednej z analiz specjalnie przygotowanych nagrań. Na każdym z nich zarejestrowano określony ruch testowanego przegubu kończyny.
- Rozbieżności pomiędzy kątami zadanymi i odczytanymi pojawiły się w przypadku zmiennej przegubowej  $\theta_2$ .

# SCHEMAT OPROGRAMOWANIA



SCHEMAT ILUSTRUJĄCY ZASADĘ DZIAŁANIA OPROGRAMOWANIA KALIBRUJĄCEGO

# WYNIKI PROCESU KALIBRACJI



ZALEŻNOŚĆ MIĘDZY WARTOŚCIĄ ZADANĄ, A WARTOŚCIĄ ODCZYTANĄ DLA ZMIENNEJ PRZEGUBOWEJ Q2 (STAW KOLANOWY), a) PRZED WPROWANIENIEM KOREKTY, b) PO PRZEPROWADZENIU KOREKTY

## LITERATURA

- [1] T. Zielińska , „Maszyny kroczące.”, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 2014.
- [2] K. Tchoń, A. mazur, R. Hossa, „ Manipulatory i roboty mobilne. Modele, planowanie ruchu, sterowanie”, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa, 2000.
- [3] Bradski G., Kaehler A.: Learning OpenCV. Computer Vision with the OpenCV Library. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2008.
- [4] Joshi S., Gujarathi S., Mirgemoving A.: Moving Object Tracking Method Using Improved Camshift With Surf Algorithm. „International Journal of Advances in Science Engineering and Technology”, 2014, 2, 2.
- [5] Allen J. G., Xu R. Y. D., Jesse S. J.: Object Tracking Using CAMShift Algorithm and Multiple Quantized Feature Spaces. „Proceedings of the Pan-Sydney area workshop on Visual information processing”, 2004, 3-7.
- [6] Comaniciu D., Ramesh V., Meer P.: Kernel-Based Object Tracking. „IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence”, IEEE Transactions on, 2003, 564-577.

## ŹRÓDŁA INTERNETOWE

- [W1] <https://www.arduino.cc/>, *Strona projektu Arduino*, Dostęp 09.2017.
- [W2] <https://botland.com.pl/>, *Strona sklepu internetowego Botland*, Dostęp 09.2017.
- [W3] <http://www.intechopen.com/books/robot-arms/kinematics-of-adeptthree-robot-arm>, A. B. Rehiara „Kinematics of AdeptThree Robot Arm”, Dostęp 09.2017.