

## Innowacyjna i elastyczna wizja, czyli jak kamery zmieniają przemysł

**Streszczenie:** Artykuł jest przeglądem możliwości i rozwiązań, jakie oferują systemy wizyjnej kontroli jakości i sterowania. Zaprezentowano w nim przykłady implementacji przemysłowych, jak również rozwiązania potencjalne. Przedstawione przykłady zaczerpnięte są z projektów i wdrożeń, które obecnie funkcjonują w zakładach produkcyjnych w Europie i Polsce. Celem artykułu jest przekonanie czytelnika do wszechstronności i wartości płynącej z rozwiązań wizyjnych.

**Słowa kluczowe:** systemy wizyjne, kamery, obrazowanie, kontrola jakości, sterowanie, systemy CAD/CAM.

### **Innovative and flexible vision – how CCTV is changing the industry**

**Summary:** The article is an overview of the potential and possibilities offered by the machine vision systems for quality inspection and control. The article also presents the examples of industrial implementation and also potential solutions. Examples described in the article are taken from the projects and implementations that are currently working in factories in Europe and Poland. The aim of this article is to convince the reader about the versatility and value that comes from vision solutions.

**Keywords:** vision systems, cameras, imaging, quality control, control systems, CAD/CAM.

## 1. Wprowadzenie

Systemy i algorytmy wizyjne (ang. *machine vision*) wkraczają w coraz to nowsze obszary przemysłu i życia codziennego. Ich wszechstronny charakter i funkcjonowanie podobne do działania zmysłu ludzkiego wzroku, pozwalają na ich zastosowanie w praktycznie każdej dziedzinie. W segmencie przemysłowym w większości przypadków pełnią one główną lub wspomagającą funkcję w kontroli jakości. Od niedawna zaczęły mieć również coraz większy udział w sterowaniu. Mogą one z powodzeniem służyć do nadzorowania przebiegu procesu czy też kontroli parametrów produkcji. Coraz częściej dostarczają informacji systemom CAM w czasie rzeczywistym, co może pozwolić np. na dostosowanie pracy obrabiarki/maszyny technologicznej do zmiennych warunków procesu. Głównymi

zaletami systemów analizy wizyjnej są m.in. możliwość obsługi skomplikowanych zadań, wysoka elastyczność zastosowania, ogromna wydajność kontroli, a także niskie koszty eksploatacji i prostota układu pod kątem mechanicznym. Omawiane systemy stosowane są obecnie we wszystkich gałęziach przemysłu, od przemysłu spożywczego, przez motoryzację aż po wysoce odpowiedzialne zastosowania militarne.

Niniejszy artykuł przedstawia szanse i możliwości zastosowań systemów wizyjnych na liniach produkcyjnych, w przemyśle wydobywczym i w poprawie bezpieczeństwa, wszędzie tam, gdzie człowiek wykonuje prace obarczone ryzykiem. Omówione zostaną także aspekty związane z wdrażaniem systemu wizyjnego dla aplikacji przemysłowej, takie jak potrzebny nakład czasu i pieniędzy, dostosowanie rozwiązania do potrzeb i proces integracji z istniejącym systemem produkcyjnym.

## 2. Elastyczność systemów wizyjnych

Rozpatrując systemy analizy wizyjnej, należy określić charakterystykę przetwarzanego sygnału. Informacje pozyskiwane są z macierzy światłoczułych sensorów w postaci najczęściej dwuwymiarowego sygnału, nazywanego obrazem. Ta, choć bardzo podstawowa informacja, ma znaczący wpływ na dalsze rozważania na temat charakterystyki systemów wizyjnych. Kamery pozwalają na obserwację polową, czyli taką, w której na jednym obrazie możliwe jest przeanalizowanie wielu informacji związanych np. z kształtem, rodzajem powierzchni, gabarytami w dwóch lub trzech wymiarach, a także rozkładu kolorów i faktury. Już ta cecha ukazuje zaletę, jaką jest elastyczność zastosowania systemu wizyjnego. Pojedyncza kamera z układem optycznym pozwala na zastąpienie szeregu narzędzi metrologicznych. Projektując stanowisko pomiarowe z użyciem jednego czujnika, możemy sprawdzić wszystkie wymienione powyżej cechy produktu.

Przykładem linii technologicznej, która ukazuje elastyczność zastosowania systemów wizyjnych, może być wylączarka produkująca w trybie ciągłym profile z tworzywa sztucznego. System obrazujący wstęgę materiału wychodzącą z maszyny pozwala na ocenę szerokości materiału, prędkość jego przesuwu, obecności ubytków i jakości krawędzi materiału.

System może zostać także rozszerzony o algorytmy analizy wzorca, co pozwoli na ocenę zgodności wytworzonego produktu pod kątem powtarzalnego wzorca kolorystycznego i faktury. Dzięki zastosowaniu specjalnego systemu oświetleniowego możliwe jest także zmierzenie grubości materiału, a w niektórych przypadkach jego kształtu w osi podłużnej. Istotny jest fakt, iż automatyczny pomiar pozwala jednocześnie na automatyczną dokumentację, w której każdy centymetr produktu ma zarchiwizowaną historię swojego wytworzenia. Elastyczność takiego systemu pomiarowego pozwala również na zastosowanie układu bez zmian mechanicznych i optycznych w przypadku zmiany kształtu produkowanego profilu z tworzywa sztucznego. Jedyne co należy zmienić to komputerowy program wykonawczy, tak aby umożliwił śledzenie innego zespołu cech profilu.

### 3. Wspomaganie sterowania

Systemy i algorytmy analizy wizyjnej znajdują zastosowanie również w układach sterowania w technologicznych maszynach CNC. Układ współrzędnych kamery, wyrażany zazwyczaj w pikselach w osi X oraz Y, może zostać sprzężony z układem współrzędnych maszyny wytwórczej. Proces takiego zestawienia dwóch układów nazywany jest kalibracją i stanowi często kluczowy element programu komputerowego. Istnieją różne metody kalibracji oparte na wzorcach kalibracyjnych, obserwacji efektów pracy narzędzia obrabiarki czy też manualnym pomiarze kluczowych wartości zestawiających obydwa układy. Najbardziej pożądane w przemyśle są układy automatyczne i takie właśnie są coraz szerzej stosowane w systemach wizyjnych. Umożliwiają one automatyczny pomiar kluczowych punktów referencyjnych o znanych współrzędnych w układzie obrabiarki i zestawienie ich z układem kamery. Wyznaczona w ten sposób macierz transformacji pomiędzy dwoma układami pozwala na szybkie i wystarczająco dokładne przejście z układu kamery do układu obrabiarki.

Systemy wizyjne umożliwiają sterowanie maszynami technologicznymi poprzez wyznaczanie trajektorii ruchu narzędzia zarówno przed procesem, jak i w czasie rzeczywistym. W pierwszym przypadku dokonana zostaje akwizycja obrazu bezpośrednio przed procesem obróbkowym. Wyznaczony cykl sterowania zostaje uruchomiony po wykonaniu obliczeń i ewentualnej akceptacji przez technika nadzorującego. Systemy czasu rzeczywistego są bardziej wymagające pod kątem komponentów obliczeniowych, ponieważ cykl obliczeniowy dla każdego obrazu musi być zazwyczaj mniejszy niż interwał sterujący obrabiarki. Niewątpliwą zaletą sterowania wspomaganego systemem wizyjnym jest podwyższenie wydajności związane z automatycznym dostosowywaniem trajektorii narzędzia do niewłaściwie umieszczonych elementów obrabianych. W konwencjonalnych systemach odpowiedzialność za prawidłowe umiejscowienie przedmiotu w polu obróbkowym spoczywa na techniku. Dzięki systemom wizyjnym zminimalizowany zostaje udział błędów ludzkich, co zmniejsza liczbę odrzutów technologicznych i niweluje przestoje w produkcji. Dzięki algorytmom, np. takim, które dostosowują trajektorię biegu narzędzia do faktycznego, a nie zaprogramowanego kształtu elementu obrabianego, możliwe jest odciążenie wymogów jakościowych na wcześniejszych etapach produkcji. Sprawia to, że system wizyjny może umożliwić redukcję kosztów produkcji w ujęciu całościowym.

Przykładem dobrze ukazującym takie zalety może być system spawania wymienników ciepła złożonych z par blach aluminiowych zestawionych w pakiety. Blachy spawane są na krawędziach laserem włóknowym wysokiej mocy. W konwencjonalnym podejściu produkcyjnym poszczególne pary blach musiały być pozycjonowane z dokładnością na poziomie pozwalającym poprawne wykonanie spoiny. Dokładność ta w tym przypadku powinna wynosić ok. 0,01 mm. Z punktu widzenia technologicznego,

wymaga to podwyższonej jakości na wcześniejszych etapach produkcyjnych, zwłaszcza że błędy wykonania poszczególnych blach są spiętrzane w wyniku zestawiania par blach w pakietach. W efekcie dokładność wytwarzania na etapie wcześniejszym, tylko ze względów technologicznych właściwych dla obróbki laserowej musi cechować się wyjątkowo małym polem tolerancji, osiągającym znacznie mniej niż 0,01 mm. Jeśli jednak do detekcji położenia krawędzi blach wykorzystamy system wizyjny skalibrowany z obrabiarką, możemy znacznie zmniejszyć wymogi jakościowe w maszynach technologicznych na wcześniejszym etapie.

Odpowiednio dobrany system optyczny pozwala na dokładność detekcji pozycji o wystarczającej dla procesu dokładności. W efekcie oprócz znacznej zmiany kosztów produkcji, uzyskujemy większą dokładność, czyli jakość produkcji, a także minimalizację odrzutów technologicznych.

## 4. Precyzja

Dokładność detekcji to kolejny aspekt przemawiający na korzyść systemów wizyjnej analizy jakości i sterowania. Przemysł maszynowy, a zwłaszcza motoryzacyjny, stawia wysokie wymagania jakościowe i wymiarowe w trakcie procesu produkcyjnego. Bardzo często brak doświadczenia w dziedzinie systemów wizyjnych i niezajomość poziomu dokładności detekcji przekreśla ich zaistnienie w wielu fabrykach w Polsce. Możliwość precyzyjnego rozpoznawania krawędzi obiektów na obrazie, co jest podstawową funkcją w przypadku wielu zastosowań, są znacznie większe niż te, oferowane przez inne automatyczne systemy kontrolujące produkcję. Dokładność tę dobitnie ukazuje przedstawiony poniżej przykład.

Dokładność detekcji położenia definiuje odległość kamery, rozdzielczość sensora oraz zastosowany obiektyw. Wyróżnić można dwa główne rodzaje detekcji krawędzi, detekcję zwykłą progową oraz zwykłą subpikselową. Dokładność subpikselowa jest metodą matematycznej interpolacji, czyli wyznaczenia wartości wirtualnych pikseli pomiędzy pikselami rzeczywistymi na podstawie ich zmienności jasności w celu zwiększenia dokładności wykrycia krawędzi. Zwiększenie dokładności w tej metodzie może być 5-krotne, a w niektórych przypadkach nawet 10-krotne [1].

Przyjmując warunki brzegowe dla typowego zadania technologicznego, można założyć, że wymagana jest obserwacja i detekcja krawędzi wału w czasie produkcji. Wał ma średnicę ok. 100 mm, przyjęte zostaje pole widzenia kamery na poziomie 150 mm. Na rynku dostępnych jest bardzo wiele kamer, najczęściej jednak mają one ustandaryzowany rozmiar matrycy wyrażany w pikselach. Są to często matryce kwadratowe o wymiarze 800, 1024, 1280 i 1600 pikseli. Dla zadanego okna widzenia uzyskujemy wyniki dokładności detekcji jak w tabeli 1, przedstawionej na następnej stronie.

Tab. 1. Zdolność rozdzielcza wybranych kamer

Rozdzielczość kamery [pix]	800	1024	1280	1600
Pole widzenia [mm]	150	150	150	150
Pix/mm	5,33	6,83	8,53	10,67
Dokładność przy detekcji progowej zwykłej [mm]	0,19	0,15	0,12	0,09
Dokładność przy detekcji progowej subpikselowej [mm]	0,04	0,03	0,02	0,02
Dokładność przy detekcji progowej subpikselowej [um]	37,50	29,30	23,44	18,75

W powyższej tabeli można zauważyć, że sam podział pola obserwacyjnego na piksele i detekcja progowa zwykła umożliwiają rozróżnienie krawędzi z dokładnością do 0,09 mm dla rozdzielczości 1600 pikseli. Zastosowanie dodatkowych algorytmów detekcji subpikselowej pozwala na detekcję krawędzi do 18  $\mu$ . Łączny czas trwania algorytmu akwizycji obrazu i jego przetwarzania można zmieścić w czasie poniżej 100 ms. Sprawia to, że systemy analizy wizyjnej są szybkie, dokładne i jednocześnie względnie tanie.

Kamery polowe to główna rodzina kamer, istnieje jednak całkiem odmienna gałąź, która pozwala jeszcze bardziej zwiększyć dokładność detekcji. Są to kamery liniowe. Kamery liniowe nie posiadają dwuwymiarowej macierzy pikseli, a jedynie jeden ich rząd. Rząd ten bardzo często zestawia ze sobą znacznie większą liczbę pikseli, przekraczającą nawet 10 tys. Obraz dwuwymiarowy osiągany jest w wyniku posuwu kamery lub obiektu w polu kamery. Znając prędkość posuwu, możliwe jest zobrazowanie pola kamerą liniową. Dla powyższego przykładu kamera z liczbą pikseli 10 tys., pozwala na detekcję krawędzi z dokładnością rzędu 3  $\mu$  dla detekcji subpikselowej. Oczywiście przetwarzanie takiego sygnału trwa dłużej niż w mniejszych rozdzielczościach i czas ten może dochodzić do ok. 5 s, w zależności od zastosowanego komputera obliczeniowego.

## 5. Systemy wizyjne a górnictwo

Systemy analizy wizyjnej znajdują coraz szersze zastosowanie i wykraczają poza dziedziny technologiczne. Coraz częściej można usłyszeć o systemach wizyjnych wspomagających pilotów samolotów czy analizujących bezpieczeństwo na drodze w trakcie jazdy samochodem, zaś na szczególną uwagę zasługują systemy wizyjne w przemyśle wydobywczym i hutnictwie. W tych dwóch dziedzinach zapisy kamer przyczyniają się do realizacji nawet bardziej odpowiedzialnych zadań niż w jakimkolwiek innym sektorze. Szczególną pozycję zyskały systemy ostrzegania pracownika lub detekcji obecności człowieka w strefie niebezpiecznej. Dzisiejsze algorytmy przetwarzania sygnałów pozwalają na

śledzenie ludzkiej sylwetki lub sygnatury termicznej w polu widzenia kamery. Dzięki temu możliwe jest określenie, czy człowiek znajduje się w strefie niebezpiecznej lub czy za chwilę do niej wejdzie. Dodatkowe algorytmy wykrywające obecność obiektów zagrażających życiu człowieka mogą ostrzegać pracownika lub też wstrzymać pracę maszyny, zanim wystąpi sytuacja niebezpieczna.

W przetwórstwie materiału wydobywanego trudno znaleźć tak wszechstronne i odpowiadające na potrzeby tej gałęzi przemysłu systemy detekcji cech jak systemy wizyjne. Dzięki systemom wizyjnym możliwe jest np. sprawdzenie stanu zróżnicowania urobku, oszacowanie składu na podstawie analizy spektralnej i rozmiaru frakcji w materiale, a także wykrycie rodzaju materiału w ścianie skalnej. Systemy wizyjne wspomagane laserem umożliwiają pomiar kształtu skały, frakcji w urobku, a także w zastosowaniach hutniczych pozwalają zmierzyć z dużą dokładnością gabaryty kęsów, blach i innych półproduktów, nawet wówczas gdy są one rozgrzane do wysokich temperatur. Dzięki możliwości śledzenia obiektów w trójwymiarowej przestrzeni i kalibracji układu kamery z systemem wydobywczym, możliwa jest robotyzacja wydobywania poprzez implementację algorytmów sterujących.

Konkluzją płynącą z powyższego artykułu jest wniosek, iż systemy wizyjne są coraz szerzej stosowane w wielu dziedzinach technologicznych i dzieje się tak głównie dlatego, że są one elastyczne i pozwalają na zwiększenie wydajności produkcyjnej. Implementacja układu wizyjnego może przynieść wysokie korzyści ekonomiczne i podnieść efektywność kontroli jakości w zakładzie technologicznym. Obecnie inwestowanie w nowe technologie i rozwiązania jest gwarantem stabilności działalności zakładu wytwórczego w warunkach dynamicznie zmieniającego się rynku zbytu. Z tego powodu w wielu zakładach wytwórczych na całym świecie standardowe urządzenia pomiarowe wypierane są przez kamery.

## Literatura

1. Hagara M., Kulla P., *Edge Detection with Sub-pixel Accuracy Based on Approximation of Edge with Erf Function*, 2011, [http://www.radioeng.cz/fulltexts/2011/11\\_02\\_516\\_524.pdf?origin=publication\\_detail](http://www.radioeng.cz/fulltexts/2011/11_02_516_524.pdf?origin=publication_detail).