

Andrzej TYKA, Andrzej GÓRALCZYK

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI,
KATEDRA WYTRZYMAŁOŚCI I TECHNOLOGII MASZYN

Wizyjne systemy pomiarowe do kontroli wymiarowej elementów maszynowych Problemy konfiguracji systemu pomiarowego

Dr inż. Andrzej TYKA

Ukończył studia na Wydziale Maszyn AGH w Krakowie w roku 1972, obronił pracę doktorską w 1981. Jest adiunktem w Katedrze Wytrzymałości i Technologii Maszyn, Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jego zainteresowania to metrologia w technikach wytwarzania maszyn, bezstykowe pomiary chropowatości powierzchni obrabianej, metrologia w systemach jakości.



e-mail: atyka@uci.agh.edu.pl

Mgr inż. Andrzej GÓRALCZYK

Ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie w roku 2001. Jest asystentem w Katedrze Wytrzymałości i Technologii Maszyn, Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zajmuje się zastosowaniami metrologii w technikach wytwarzania maszyn.



Streszczenie

W pracy przedstawiono problemy i uwarunkowania związane z zastosowaniem wizyjnych systemów z komputerowym przetwarzaniem obrazu, w zastosowaniu do kontroli wymiarowej elementów maszynowych.

Poruszono zagadnienia związane z konfiguracją systemów wizyjnych w aspekcie zapewnienia odpowiedniej rozdzielczości i niepewności pomiaru. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz rozwiązania o charakterze użytkowym.

Abstract

The article presents problems and conditions connected with application of visual measurement systems to dimensional inspection of machine parts.

Matters connected with system configuration in suitable resolution and uncertainty aspect has been risen. Results of experimental studies and functional solution developed by authors has been presented.

Wstęp

Ciągły postęp w budowie przetworników obrazu, stwarza nowe możliwości ich wykorzystania w metrologii wielkości geometrycznych. W ostatnich latach cyfrowe przetwarzanie obrazów, jest rozwijane jako wydzielony obszar badań, a wiele rozwiązań zostało zastosowanych w przemysłowych układach pomiarowych.

Do głównych cech wyróżniających techniki optyczne wykorzystujące komputerowo wspomaganą analizę obrazu należą:

- zbieranie informacji z większego obszaru w sposób całościowy,
- pomiar bezstykowy,
- możliwość analizy zjawisk statycznych, dynamicznych, wibracji i uderów,
- możliwość wykorzystania różnorodnych algorytmów przetwarzania obrazu,
- archiwizacja danych pomiarowych,
- modułowy charakter systemu pomiarowego.

Użytkowe rozwiązania wizyjnych systemów pomiarowych, w zastosowaniach do kontroli wyrobów produkowanych maszynowo, są zestawiane najczęściej z typowych modułów elektroniki przemysłowej o dopasowanych charakterystykach elementów składowych. Ze względu na złożoność oraz występujące ograniczenia, zintegrowane wizyjne systemy pomiarowe wymagają eksperymentalnego rozpoznania cech metrologicznych.

Czynniki wpływające na wybór konfiguracji systemu pomiarowego

Wybór konfiguracji wizyjnego systemu pomiarowego przeznaczonego do kontroli wyrobu maszynowego metodą optyczną, określonego warunkami specyfikacji geometrycznej, wymaga uwzględnienia następujących czynników:

- zachowanie obszaru obserwacji badanej powierzchni z odpowiednią rozdzielczością optyczną oraz głębią ostrości,
- uwzględnienie układu baz pomiarowych przedmiotu,
- określenie odpowiednich charakterystyk geometrycznych elementów rzeczywistych badanego wyrobu,
- oszacowanie odpowiednich odchyłek geometrycznych wyrobu w celu umożliwienia porównania ich z określonymi wielkościami granicznymi (na podstawie przyjętej specyfikacji geometrycznej wyrobu).

Usytuowanie układu kamery o zdefiniowanej rozdzielczości wraz z obiektywem, względem obszaru badanej powierzchni, ma istotny wpływ na wynikową rozdzielczość pomiarową systemu wizyjnego. Analizowany obraz elementów badanej powierzchni, umożliwia wyznaczenie odpowiadających jej wymiarów lokalnych. Wartości wymiarów wyliczane są z wzajemnego położenia krawędzie lub środków ciężkości elementów obrazu.

Pomiary wizyjne elementów sprawdzanych w trakcie przemieszczania (transportu), wymagają odpowiednich rozwiązań układów optycznych (obiektywy telecentryczne), a także odpowiedniego oprogramowania. Zastosowane w takich systemach kamery, aby umożliwić identyfikację cech geometrycznych, muszą zapewnić ostry obraz przedmiotu w ruchu.

W systemach wizyjnych stosowanych do pomiaru wielkości geometrycznych, można wyróżnić szereg błędów pochodzących z różnych źródeł. Do najważniejszych elementów systemu, które mogą wprowadzać błędy, należą:

- przetwornik CCD,
- układ optyczny,
- geometria systemu pomiarowego,
- wpływ czynników zewnętrznych,
- oświetlenie powierzchni mierzonego przedmiotu.

Do najważniejszych błędów wnoszonych przez układ przetwornika CCD kamery, należą błędy próbkowania (sampling) oraz błędy kwantyzacji (quantization).

Błędy związane z próbkowaniem wynikają bezpośrednio z zastosowanej rozdzielczości matrycy przetwornika o określonej liczbie pikseli. W trakcie pomiaru obraz przedmiotu obserwowanego jest optycznie dopasowany do ograniczonej siatki pikseli tworzącej

przetwornik CCD. Aby nie utracić informacji dotyczącej szczegółów obserwowanego obiektu, należy spełnić warunek: odległość między dwoma pikselami, określona jako interwał próbkowania, nie powinna przekroczyć połowy wielkości najmniejszego szczegółu obrazu rzutowanego na siatkę detektorów (pikseli) [1]. Błąd próbkowania objawia się „rozmyciami” linii obrazu dla krawędzi, które nie pokrywają się granicami pikseli.

Operacja kwantyzacji podyktowana jest koniecznością transformacji jaskrawości obrazu (dla poszczególnych pikseli) z postaci ciągłej do dyskretniej, która może być następnie przetwarzana przez systemy komputerowe. Typowym rozwiązaniem stosowanym w kamerach przemysłowych jest 8-bitowa skala szarości, która umożliwia rozróżnienie 256 poziomów jaskrawości. W przypadku zastosowań specjalnych stosowane są układy o większej ilości stopni szarości, np. 12-bitowe (4096 stopni szarości).

Czułość widmowa przetworników CCD jest zróżnicowana w zależności od długości fali światła padającej na detektor. Prowadzi to do wyprofilowania i specjalizacji produkowanych kamer w zależności od widmowego zakresu wykorzystywanego oświetlenia wymaganego przez dane zastosowanie.

Otwarta architektura systemów wizyjnych zakłada możliwość wykorzystywania typowych zróżnicowanych układów obiektywowych, których usytuowanie względem sensora CCD (odległość od sensora) jest różna w zależności od systemu mocowania C lub CS. Stosowane są różne odmiany optycznych układów obiektywowych, zarówno standardowe jak również specjalne, do których należą systemy obiektywowe: telecentryczne, endoskopowe, szeroko-kątne (rybie oko) [2][3].

W rozwiązaniach pomiarowych, w których obiekt może znajdować się w różnych odległościach od obiektywu kamery, dla zminimalizowania zmian wielkości obrazu rzutowanego na matrycę CCD, są stosowane obiektywy telecentryczne, przydatne szczególnie w kontroli obiektów o niewielkich wymiarach [2]. Standardowe układy obiektywowe umożliwiają odwzorowanie obiektu obserwowanego, którego wymiary obrazu zmieniają się w zależności od odległości od obiektywu kamery. Układy obiektywowe stosowane w systemach wizyjnych mogą wprowadzać szereg zniekształceń geometrycznych obrazu [4]. Do najważniejszych źródeł błędów pomiaru wnoszonych przez układ optyczny można zaliczyć [5]:

- dystorsję baryłkową (ujemną) oraz dystorsję poduszkową (dodatnią),
- astygmatyzm,
- aberracje.

Konfiguracja geometryczna systemu pomiarowego może wprowadzać szereg zniekształceń obrazu. Niezachowanie prostopadłości osi kamery względem powierzchni obserwowanej prowadzi do istotnych zniekształceń związanych ze zjawiskiem perspektywy. W szczególnych przypadkach, gdy nie jest możliwe spełnienie warunku prostopadłości, konieczne jest wykorzystanie możliwości specjalnego oprogramowania, które daje możliwość korygowania tego rodzaju błędów z poziomu oprogramowania. Problem ten nabiera znaczenia w przypadku realizacji wizyjnych pomiarów wielkości geometrycznych części maszyn, gdy wymogi specyfikacji geometrycznej wskazują na wykorzystanie określonych baz pomiarowych. Również optyczne pomiary odchyłek położenia wymagają specjalnych rozwiązań układowych dotyczących zarówno geometrycznej konfiguracji systemu pomiarowego, jak i procedur jego nadzorowania.

System oświetlający przedmiot poddany pomiarom z udziałem kamery wizyjnej, powinien uwzględniać ogólny charakter geometryczny przedmiotu oraz strukturę geometryczną jego powierzchni. Dla powierzchni błyszczących stosuje się najczęściej źródła światła rozproszonego o usytuowaniu frontalnym [2][3]. Do najczęściej stosowanych odmian układów oświetlających, można zaliczyć:

- oświetlenie frontalne:
- kierunkowe,

- dyfuzyjne,
- polaryzowane,
- współosiowe,
- wiązką modyfikowaną (prażki, siatki, okręgi),
- oświetlenie tylne:
- kierunkowe,
- dyfuzyjne,
- polaryzowane.

Właściwy dobór rodzaju oraz sposób ukształtowania układu oświetlającego warunkuje możliwości minimalizacji błędów pomiarowych w systemach wykorzystujących układy wizyjne.

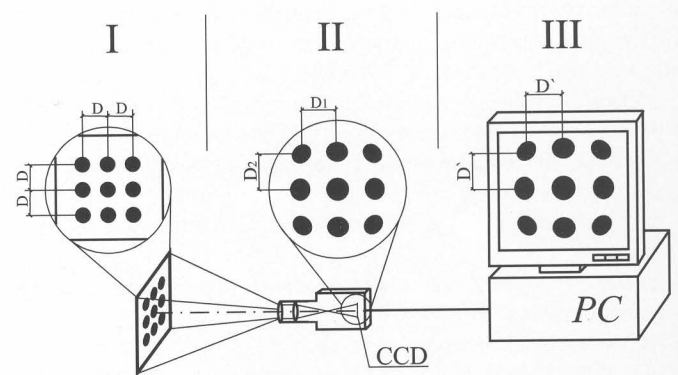
Możliwości korekcji błędów w systemach wizyjnych

Wykorzystanie systemów wizyjnych w pomiarach wielkości geometrycznych prowadzi do konieczności powiązania układu współrzędnych przedmiotu rzeczywistego z układem współrzędnych obrazu tego przedmiotu, obserwowanego na ekranie monitora (układ współrzędnych ekranu) z uwzględnieniem specyfiki oprogramowania pomiarowego. W celu stwierdzenia występowania zniekształceń geometrycznych obrazu obserwowanego na monitorze komputera pomiarowego, stosowane są odpowiednie wzorce do kalibracji systemów wizyjnych. Wzorce te produkowane są w postaci płytek z naniesionymi znakami graficznymi obserwowanymi przez system wizyjny. Wymiary wzorców jak również ich znaków graficznych, są zróżnicowane co do wielkości [6]. Zastosowany wymiar wzorca powinien zapewnić wypełnienie całego pola widzenia kamery CCD. Kalibracja systemu wizyjnego dla realizacji pomiarów wielkości geometrycznych, może przebiegać w dwóch etapach:

- korekcja sprzętowa,
- kalibracja programowa.

Korekcja sprzętowa może obejmować dostosowanie geometrycznego układu przedmiot-system pomiarowy (obiektyw-kamera CCD). Zagadnienia te obejmują również dostosowanie geometrycznego zespołu układu pomiarowego w celu minimalizacji zniekształceń obrazu związanych ze zjawiskiem perspektywy.

Kalibracja programowa systemu pomiarowego ma na celu powiązanie zdefiniowanej geometrii wzorca z jego obrazem obserwowanym na ekranie komputera pomiarowego. Umożliwia to przeliczenie współrzędnych ekranowych (piksele) na współrzędne geometrii wzorca (mm) [7]. Na rys. 1 przedstawiono główne strefy wpływu błędów geometrycznych pomiarowego systemu wizyjnego, podczas jego kalibracji.



Rys. 1. Strefy wpływu błędów geometrycznych pomiarowego systemu wizyjnego: I – strefa wzorca wielopunktowego o znanej geometrii, II – strefa przetwornika CCD (zniekształcony obraz wzorca), III – strefa oprogramowania

Najczęściej spotykam, ze względu na uniwersalność, sposobem określenia położenia punktów obrazu pomiędzy znakami wzorca jest interpolacja liniowa [7].

Skorygowany i skalibrowany system wizyjny w firmowych aplikacjach oprogramowania umożliwia automatyczną identyfikację wybranych cech geometrii przedmiotu np.: odległości otworów, odległości krawędzi, odległości środków ciężkości [7].

Wyniki badań

Podjęte prace badawcze ukierunkowano na rozpoznanie właściwości metrologicznych optycznego systemu z cyfrowym przetwarzaniem obrazu do pomiaru wymiarów liniowych, w zależności od konfiguracji geometrycznej systemu optycznego. Następnie dokonano badań sprawdzających zaprojektowanego użytkowego systemu do kontroli rozstawu otworów w korpusach zespołów hydraulicznych produkowanych seryjnie.

Na rys. 2 przedstawiono schemat układu badawczego z cyfrowym przetwarzaniem obrazu, w którym kamera CCD jest podłączona do oprogramowanego systemu komputerowego. Do badań wykorzystano kamerę o rozdzielczości 768 (H) x 576 (V), którą wyposażono w dopasowany obiektyw o zmiennej ogniskowej Meteor 1,8/9-38, framegrabber Meteor II oraz oprogramowanie pomiarowe Inspector 3.1 firmy Matrox. W trakcie pomiarów, z wykorzystaniem systemu wizyjnego określono odległość pomiędzy znakami optycznymi obiektu mierzonego, którą nastawiano zgodnie z przyjętym programem badań. W tabeli I zamieszczono uzyskane wyniki pomiarów wizyjnych odległości znaków obiektu mierzonego (dla siedmiu różnych nastaw szerokości pola widzenia w zakresie 100-1000mm).

Na podstawie 30 powtórzeń pomiarowych określono wartości odchyłeń standardowych dla umożliwienia oceny niepewności standardowej pomiaru wymiarów długościowych w zróżnicowanej skali odwzorowania. Określono również, odpowiadającą im rozdzielczość pomiarową. Uzyskane wyniki eksperymentalne umożliwiły potwierdzenie założeń teoretycznych dotyczących wynikowej rozdzielczości pomiarowej kompletnego systemu wizyjnego z zachowaniem dostatecznej niepewności standardowej pomiaru odległości. Umożliwiło to, realizację zoptymalizowanego systemu użytkowego do kontroli rozstawu otworów wierconych w seryjnie produkowanym wyrobie przemysłowym, uzyskana rozdzielczość pomiarowa wynosi 0,01mm, przy niepewności standardowej 0,007mm.

Szerokość pola obserwacji L [mm]	1000	850	700	550	400	250	100
Skala odwzorowania K [mm/pix]	1,27	1,08	0,89	0,7	0,51	0,32	0,13
Rozdzielczość R [mm]	0,03	0,027	0,022	0,017	0,0127	0,008	0,003
Odchylenie standardowe σ [mm]	0,127	0,108	0,098	0,112	0,061	0,042	0,010

Tab. 1. Zestawienie wyników badań konfiguracji wizyjnego systemu pomiarowego

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły związek pomiędzy rozdzielczością pomiarową i niepewnością standardową pomiaru dla zróżnicowanych konfiguracji systemu optycznego kamery pomiarowej i wielkości mierzonego obiektu. Zaprojektowany i zintegrowany system pomiarowy przeznaczony do przemysłowych pomiarów rozstawu odległości otworów w częściach typu korpus, spełnia warunki systemu sterowania jakością (dla tolerancji wymiaru $T=0,4\text{mm}$ $\sigma=0,007\text{mm}$ $C_q=1,9>1,33$). W trakcie badań eksperymentalnych potwierdzono istotną rolę jakości i sposobu oświetlenia.

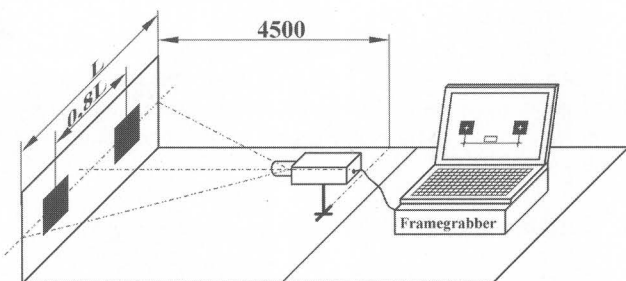
Rozpowszechnienie przetworników obrazu wysokiej rozdzielczości stosowanych w przemysłowych kamerach pomiarowych (np. 2048x2048, przy wymiarach elementu matrycy $7,4\mu\text{m}$), stwarza nowe możliwości w budowie systemów przeznaczonych do kontroli coraz to większych obiektów z pożądaną przez metrologa niepewnością pomiaru. W artykule, ze względu na złożoność przedstawionej techniki pomiarowej, omówiono tylko wybrane aspekty zastosowania wizyjnych systemów pomiarowych w metrologii wielkości geometrycznych, co nie wyczerpuje związanych z tą tematyką zagadnień.

Literatura

- [1] M. SONKA, V. HLAVAC, R. BOYLE: *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. Chapman & Hall, London 1993.
- [2] C. DEMANT, B. STREICHER-ABEL, P. Waszkewitz: *Industrial Image Processing*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1999.
- [3] K. H. LEARMAN: *Optical Methods in Experimental Solid Mechanics*. Springer-Verlag New York 2000.
- [4] M. B. PIASECKI: *Fotogrametria lotnicza i naziemna*. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych. Warszawa 1968.
- [5] SZ. SZCZENIOWSKI: *Fizyka doświadczalna – Optyka*. PWN. Warszawa 1967.
- [6] MELLE GRIOT: *Machine Vision Product Guide 1998*
- [7] MATROX: *Inspector 3.1 User Guide*.

Title: Visual measurement systems to dimensional inspection of machine parts.
The problems of measurement system configuration.

Artykuł recenzowany



Rys. 2 Schemat konfiguracji układu przyjętego do wyznaczania niepewności standardowej pomiarów odległości znaków optycznych, L – szerokość pola obserwacji dla ustalonej odległości kamery od ekranu

Wnioski

Wykorzystanie wizyjnych systemów pomiarowych do kontroli części produkowanych seryjnie, jest możliwe w odniesieniu do wymiarów geometrycznych wyznaczonych położeniem krawędzi przedmiotu badanego. Dotyczy to, różnych elementów typu płytka, lub np. masowo produkowanych elementów wykrawanych. Dla części o znacznej grubości, wałków itp., występują ograniczenia typowe dla pomiarów optycznych.