

Streszczenie dysertacji doktorskiej „Wysokorozdzielcze obrazowanie jednopikselowe w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni”

autorstwa Rafała Stojka

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań nad hiperspektralnym obrazowaniem jednopikselowym w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Dysertacja składa się ze wstępu oraz trzech zasadniczych części.

Jednopikselowe obrazowanie skaningowe w zakresie podczerwieni

W pierwszej części zaprezentowano wyniki badań dotyczących jednopikselowego obrazowania skaningowego w zakresie podczerwieni. Metoda ta umożliwia uzyskanie obrazów o wysokiej rozdzielczości przestrzennej przy wykorzystaniu pojedynczego detektora jednopikselowego (ang. bucket detector), źródła światła laserowego pracującego w jednym lub wielu zakresach promieniowania oraz dwuosiowego skanera galwanometrycznego.

Przeanalizowano wpływ doboru kluczowych elementów optycznych na parametry obrazów uzyskiwanych w procesie skanowania oraz przeprowadzono testy oceniające skuteczność iteracyjnych poprawek układu optycznego w poprawie jakości obrazu. Przedstawiono również algorytm rekonstrukcji umożliwiający przetwarzanie arbitralnie wybranych zestawów punktów pomiarowych na obraz końcowy.

W rozdziale tym opisano dwie istotne nowości naukowe. Pierwszą z nich jest zastosowanie techniki obrazowania skaningowego do zobrazowania czułości widmowej detektora podczerwieni, w sposób analogiczny do mikroskopii LBIC (ang. Laser Beam Induced Current). Zaproponowany układ umożliwił uzyskanie wysokiej rozdzielczości przy zachowaniu stosunkowo krótkiego czasu akwizycji - osiągnięto rozdzielczość 1000×1000 pikseli przy czasie pięciu sekund. W pracy przedstawiono także przykłady praktycznych zastosowań tej metody w badaniach przemysłowych oraz omówiono, w jaki sposób uzyskane informacje przyczyniły się do poprawy jakości analizowanych produktów.

Drugim nowatorskim rozwiązaniem zaprezentowanym w tym rozdziale jest hiperspektralny mikroskop skaningowy wykorzystujący pojedynczy detektor o krótkim czasie odpowiedzi oraz optyczny oscylator parametryczny (ang. Optical Parametric Oscillator - OPO). Zawężenie pola widzenia detektora do aktualnie oświetlanego fragmentu próbki oraz redukcja szumów odczytu przy użyciu detektora referencyjnego i precyzyjnego układu wyzwalającego pozwoliły osiągnąć wysoki współczynnik sygnału do szumu (ang. Signal to Noise Ratio - SNR) oraz dużą rozdzielczość pomiaru. Zastosowanie OPO do płynnej zmiany długości fali generowanych impulsów światła umożliwiło dodatkowo zebranie danych o widmie odbiciowym próbki w zakresie podczerwieni dla każdego z rejestrowanych pikseli.

Uzyskanie hiperspektralnych obrazów o wysokiej rozdzielczości i korzystnym SNR, przy jednocześnie krótkim czasie akwizycji oraz bez konieczności stosowania kriogenicznie chłodzonej matrycy detektorów, wskazuje na potencjał zaproponowanego układu jako atrakcyjnej alternatywy wobec istniejących rozwiązań, takich jak obrazowanie hiperspektralne z wykorzystaniem spektroskopii fourierowskiej czy ramanowskiej.

Obrazowanie kompresywne z użyciem modulatora DMD

Drugi rozdział dysertacji prezentuje wyniki badań nad obrazowaniem jednopikselowym z wykorzystaniem matrycy mikrozwierciadeł DMD (ang. Digital Micromirror Device) w zakresie podczerwieni i światła widzialnego. Podobnie jak w przypadku obrazowania skaningowego, do uzyskania obrazu stosowany jest pojedynczy detektor światła. Kluczową różnicą w konstrukcji układu optycznego jest wykorzystanie modulatora DMD, który umożliwia szybkie próbkowanie przestrzenne obrazu przy użyciu arbitralnie dobranych masek binarnych.

Na początku rozdziału przedstawiono zjawiska optyczne zachodzące na powierzchni modulatora DMD, mające wpływ na jakość uzyskiwanych obrazów, a także omówiono ideę pomiaru kompresywnego, obejmującą sposób próbkowania oraz rekonstrukcji obrazu na podstawie danych niepełnych.

W dalszej części zaprezentowano nowe algorytmy kompresywnego pomiaru i rekonstrukcji, które umożliwiają znaczące skrócenie czasu akwizycji obrazu. Opracowane algorytmy nie wymagają adaptacyjnego próbkowania sceny, a ich koszt obliczeniowy jest na tyle niski, że rekonstrukcja obrazu może być prowadzona w czasie rzeczywistym na standardowym komputerze wyposażonym w kartę graficzną.

Omówiono także wyniki testów układu optycznego, w którym pojedynczy detektor zastąpiono dwoma detektorami jednoelementowymi, z których każdy odpowiadał za detekcję światła w innym zakresie spektralnym lub dla innego stanu polaryzacji. Potwierdzono również możliwość zastosowania metody do uzyskania wysokiej jakości obrazów mikroskopowych w zakresie podczerwieni.

Najważniejszymi nowościami naukowymi opisanymi w tym rozdziale są:

- Uzyskanie rekonstrukcji obrazu z pomiaru kompresywnego w czasie rzeczywistym dla rozdzielczości rzędu 1024×768 pikseli,
- Zastosowanie modulatora DMD do jednoczesnego obrazowania w zakresie podczerwieni i światła widzialnego, z zachowaniem wysokiej jakości obrazu.

Porównanie układów obrazujących wykorzystujących kamerę oraz pojedynczy piksel, przewaga multipleksji w obrazowaniu

W trzeciej części pracy teoretycznie opisano oraz eksperymentalnie potwierdzono przewagę stosowania multipleksji i kompresji pomiarów w obrazowaniu w zakresie podczerwieni.

Zjawisko przewagi multipleksji, znane także jako przewaga Fellgetta, jest powszechnie wykorzystywane przy projektowaniu spektrofotometrów działających w zakresie podczerwieni. Zastosowanie tej zasady w obrazowaniu jednopikselowym wymagało jednak szczegółowej analizy.

W rozdziale omówiono wpływ multipleksji oraz pomiaru kompresywnego na jakość uzyskiwanego obrazu w sytuacjach, gdy dominującym źródłem szumu jest szum fotonowy badanej sceny lub szum własny detektora. Wskazano również, w jakich warunkach układy opisane w rozdziale drugim i trzecim mogą zapewniać wyższą jakość obrazowania w porównaniu z układami opartymi na matrycach detektorów.