

Andrzej MAJDE

Instytut Budowy Dróg i Ulic
Politechniki Śląskiej

NOWE OBLCICZE FOTOGRAMETRII DYNAMICZNEJ

Streszczenie. Przedmiotem opracowania jest prezentacja stanu aktualnego oraz możliwości i kierunków rozwoju zautomatyzowanych systemów fotogrametrycznych. Ich część instrumentalna - to zespół elektronicznych układów obrazujących podłączonych bezpośrednio do komputera. Oprogramowanie komputera zapewnia spływ sygnałów obrazowych oraz ich obróbkę w czasie, pozwalającym na wykorzystanie przetworzonej informacji geometrycznej do sterowania maszynami i urządzeniami.

W artykule przedstawiono nie tylko charakterystykę możliwości oraz zasady wykorzystania elektronicznych układów obrazujących, ale i systematykę geometryczno-logicznych zasad dynamicznego rozwiązywania zadań pomiarowych aż do poziomu wytworzenia informacji sterującej. W systematyce tej uwzględniono, obok zadań i podejść znanych z literatury, również zadania bądź podejścia nowe, logiczne wynikające z aktualnych i przewidywanych możliwości sprzętu.

TROCHĘ HISTORII

W zamierzonych czasach naziemnej fotogrametrii topograficznej problem ruchu nie istniał. Góry stały spokojnie, kamery też.

Z chwilą przeniesienia kamer na balon, samolot, helikopter, a ostatnio i satelitę pojawił się negatywny efekt ruchu - rozmazanie obrazu. Wiele lat pracy konstruktorów nad coraz lepiej tłumiącymi drgania zawieszzeniami kamer, coraz szybszymi i sprawniejszymi migawkami, a ostatnio nad kompensacyjnym ruchem śledzącym kamer (nachylania podłużne) lub negatywu (przesuw filmu) w momencie naświetlania zredukowano dziś rozmazanie niemal do poziomu rozdzielczości. Problem więc znikł, cenna mobilność kamer i uniezależnienie fotogrametrii od dostępności terenu pozostały.

Nowym jakościowo zjawiskiem było pojawienie się ruchu jako przedmiotu pomiaru.

Najprostszym metodycznie i technicznie zadaniem tego typu jest niewątpliwie terrofotogrametryczny pomiar eksploatowanych partii kopalń odkrywkowych, wielkich składowisk, procesów glaciologicznych itp. Względna powolność zjawisk pozwala na pomiar ich przebiegu wg klasycznych technologii, a dla spełnienia czasowych wymagań klienta wystarcza na ogół usprawnienie organizacji, trójmianowości przy pomiarze zdjęć czy lekka automatyzacja procesów obliczeniowych.

Próby włączenia fotogrametrii lotniczej do obserwacji rozległych obszarowo zjawisk dynamicznych szalenie utrudnia pogoda. Pewnego impulsu w tym kierunku dostarczą, być może, właśnie kamery z kompensacją rozmazania, pozwalające na przedłużenie naświetlania oraz niższy lot (np. fotografowanie spod pułapu chmur). Pozwolą one zapewne na technicznie użyteczne zatrudnienie fotogrametrii na wielkich kopalniach odkrywkowych, ale już procesy tak nagłe i szybkie, jak np. powódź zostaną poza naszym zasięgiem. Ścisłej - możemy się pokusić o pełne udokumentowanie metryczne zarejestrowanych stanów, ale będzie to i tak informacja o znaczeniu historycznym. Pobije nas na głowę byle kamera telewizyjna, przekazująca aktualny obraz z samolotu bezpośrednio na monitory w ośrodkach dyspozycyjnych.

Prawdziwą mnogość zadań dynamicznych znajdujemy dopiero wśród prac usługowych dla różnych dziedzin nauki i techniki. Od ruchów tak wolnych, jak skokowe obciążanie elementów czy konstrukcji po tak szybkie, jak proces wybuchowy; od zadań tak prostych, jak określenie maksymalnej amplitudy drgań nieruchomego obiektu po tak skomplikowane, jak określenie procesu zmian kształtu trójwymiarowego obiektu lub określenie wszystkich parametrów ruchu ciała sztywnego; od obiektów tak wielkich, jak statek po tak znikome, jak mikrozarzysowania w betonie. Podobne bogactwo wykazuje też metodyka rozwiązania poszczególnych zadań - od prostego przeskalowania wyników pomiaru po pełne opracowanie przestrzenne z samokalibracją zdjęć, uzupełniane czasami wtórnym przetwarzaniem wyników wg dostarczonych przez klienta zasad lub algorytmów.

Cechą wspólną tych wszystkich opracowań jest jednak długie oczekiwanie na wynik. Bazując na fotografii można bowiem zaprząć do pracy szybkobieżne kamery filmowe, ale zarejestrowany materiał trzeba jednak wywołać, utrwalić i wysuszyć, a potem długo mierzyć i liczyć. I dlatego z powodzeniem badamy zachowanie się obiektów doświadczalnych czy prototypowych, rozpoznajemy różne zjawiska, ale nie uczestniczymy w procesach technologicznych, gdzie informacja (geometryczna niejednokrotnie także) musi być natychmiast przetworzona na decyzję.

Metryczna informacja o przedmiocie (obróbki np.) musi bowiem być dostarczona tak szybko, aby wyciągnięte w wyniku jej analizy wnioski zdążyły pętlą zwrotną przed następną operacją procesu.

ELEMENTY PODSYSTEMU PRZEMYSŁOWEJ FOTOGAMETRII DYNAMICZNEJ

Z dokonanego już wprowadzenia jasno wynika, iż w rzeczywistości dynamicznym systemie fotogrametrycznym nie może być ani fotografii, ani człowieka. Są to bowiem jedynie dziś czynniki, marnujące cenny w technologii czas.

Na materialne elementy takiego systemu składają się:

- jakieś kamery, czy ogólniej sensory optyczne,
- komputer wraz z odpowiednimi urządzeniami wejściowymi i wyjściowymi (te ostatnie mogą być ograniczone do połączeń z zespołami nadającymi ruch albo z narzędziowym oprzyrządowaniem stanowiska roboczego).

Niematerialnymi elementami systemu będą:

- informacja niezbędna dla inicjacji procesu pomiarowego,
- informacja o dopuszczalnych obiektach i zdarzeniach, niezbędna dla przetworzenia wyników pomiaru na sygnały sterujące,
- oprogramowanie.

O komputerze nie ma co pisać, ale o kamerach raczej trzeba.

Najistotniejszą cechą wszystkich kamer wideo jest punktowe zbieranie informacji z płaszczyzny obrazowej, przy czym elementarna postać informacji zawiera, obok zapisu średniej jasności (oczywiście skwantyfikowanej, jeśli wideokamera ma współpracować bezpośrednio z komputerem) w obszarze piksela, także cyfrowo określoną jego lokalizację (czyli po prostu współrzędne tłowe albo wielkości bezpośrednio na nie przeliczalne).

Ze względu na konstrukcję i organizację wnętrza wideokamery, tj. płaszczyzny obrazującej i systemu zbierania informacji, należy wyróżnić:

- Standardowe kamery wideo, niewątpliwie najłatwiej dostępne, ale i najmniej dokładne. Pozycja piksela ustalana jest w nich przez chwilowe napięcie cewek odchylających, a więc kolejne współrzędne tego samego punktu mogą być zniekształcone z tytułu wahań napięć zasilających. Inną ich wadą jest szeregowa transmisja danych, a jeszcze inną - niska częstotliwość (pełny obraz powstaje "tylko" 25 razy na sekundę).

- Znacznie stabilniejsze geometrycznie są kamery, wyposażone w sensory macierzowe (MOS lub CCD w języku komputerowców). Taka płytką obrazująca jest konstrukcyjnie podzielona na pewną liczbę pikseli, a więc jedynym źródłem niestabilności współrzędnych danego piksela mogłyby być ewentualnie odkształcenia, co wydaje się mało prawdopodobne. O parametrach geometrycznych

tego typu kamer najlepiej mówią wymiary: piksela - od 12×12 do $55 \times 55 \mu\text{m}$ oraz całego sensora - od 400×500 do 800×800 pikseli. Gęstość pomiaru jest więc porównywalna z gęstością obrazowania naszej domowej telewizji, no i wygląda dość kiepsko na tle klasycznej fotogrametrii. Przyjmując np. rozdzielczość 50 linii na milimetr (tj. $20 \mu\text{m}$), dochodzimy łatwo do wymiarów negatywu rzędu 8×10 lub 16×16 milimetrów, czyli do wymiaru kadru kamer filmowych 16 mm (niemal dokładnie) lub 35 mm.

Specjaliści, zajmujący się tą dziedziną fotogrametrii, widzą jednak szerokie perspektywy doskonalenia rozdzielczości, a więc i dokładności systemów wideo. Przewidują oni mianowicie:

- Możliwość zainstalowania sensorów o wymiarach 4096×4096 pikseli, co w przyjętej wyżej konwencji porównawczej prowadzi do wymiarów kadru rzędu 8×8 centymetrów!

- Możliwość zbudowania macierzy z aktualnie dostępnych sensorów co, przy swobodzie doboru ogniskowej obiektywu, znosi właściwie wszelkie ograniczenia rozdzielczości, rozumianej kątowno (osobiście mam tu obawy o "zapełnienie" linii styku sensorów).

- Możliwość wykorzystania zmodyfikowanych kart RAM (czyli pamięci komputerowych) jako sensorów optycznych, co jest chyba najbardziej szokującą alternatywą. Stopień ich upakowania każe bowiem podejrzewać jakąś niesamowitą rozdzielczość. Jeśli sensor taki, będąc "ładowany" informacją optyczną, pełniłby dalej funkcję pamięci komputera, to komplet danych fotogrametrycznych byłby generowany bezpośrednio w jego "wnętrzu"!

I jeszcze jedna sprawa. Otóż powszechnie uważa się, iż przy wykorzystaniu obrazów o strukturze rastrowej geometryczna dokładność opracowania nie może przekroczyć granicy 0,6 - 0,9 piksela. W jednym z artykułów nt. fotogrametrii dynamicznej znalazłem natomiast przewidywanie, że przez odpowiednią obróbkę dokładność można podciągnąć do poziomu 4 do 10% wymiaru piksela. Przez analogię z proporcjami między punktową i liniową rozdzielczością stereoskopową rozumiem, że byłoby to osiągalne dla stosunkowo długich linii prostych, ale koniecznie skośnych względem rastrowej struktury sensora. Mogę sobie wyobrazić, iż wspólna obróbka serii obrazów nieruchomego tła przy lekko zmieniającej się pozycji kamery (np. minimalny obrót) da również podobny efekt. Ale przekonany nie jestem, że któraś z tych dróg sprowadzi dokładność aż do poziomu $1/25$ piksela!

SYSTEM FOTOGRAMETRYCZNO-STERUJĄCY W AKCJI

Założenia wstępne

Założmy, że obszarem działania systemu będzie pewien zamknięty wycinek przestrzeni, w którym znajduje się pewna liczba obiektów stałych o dowolnym kształcie i położeniu. Innymi słowy, na początek decydujemy się na działanie w otoczeniu, które można rozpoznać do końca. Myślę, że w ten sposób łatwiej będzie uwypuklić zasady działania systemu. Na końcu założenie to będzie już mniej istotne. Może nawet odrzucimy je?

Od systemu oczekiwać będziemy:

- obserwacji swego otoczenia i reakcji na pewne zdarzenia;
- wykonywania pewnych działań na pojawiających się w obszarze nowych obiektach;
- celowego przemieszczania się w obszarze.

Jasne jest więc, że system musi:

- poznać, czy raczej zapamiętać obszar działania;
- umieć rozpoznać pojawiające się obiekty;
- wiedzieć, co z nimi robić, itd., itp.

Logikę koniecznych działań, które doprowadziłyby do uruchomienia takiego systemu, śledzić będziemy metodą małych kroczków. Aby sobie przy tym nie komplikować życia, pewne szczegóły techniczne omówimy w dalszej kolejności, inne być może pominiemy w ogóle.

Zacznijmy od ustawienia w obszarze działania pewnej liczby kamer, podłączonych do komputera. Mamy więc już "oczy" i "mózg".

Faza I - przygotowawcza, wewnętrzno-fotogrametryczna

W fazie tej system musi nauczyć się otoczenia, a więc rozpoznać je i zmagazynować wiedzę o nim w postaci najbardziej odpowiedniej dla sprawnego wykonywania przyszłych działań. W tym celu potrzeba i wystarczy:

- założyć pewną liczbę punktów osnowy, sygnalizując je i dostarczając ich przestrzenne współrzędne;
- zarejestrować obrazy i dokonać samoorientacji wszystkich kamer oraz zagęścić zbiór punktów, opisujących otoczenie;
- utworzyć bank informacji.

Przydatne do dalszych działań zbiory danych zawierać powinny (muszą?):

- pełną informację o orientacji (wewnętrznej i zewnętrznej) kamer;
- zapis obrazów z wszystkich kamer, najlepiej w dwóch wersjach - pełnej i syntetycznej;

- zbiór współrzędnych przestrzennych ograniczonej liczby samodzielnie wybranych punktów.

Rozwiązanie sieci fototriangulacji jest dziś w pewnym sensie sprawą banalną, na mówienie o tworzeniu banku danych jeszcze za wcześnie. Sprawą kluczową dla całego zadania jest natomiast korelacja, którą nasz system musi umieć robić samodzielnie, i to na kilka różnych sposobów czy też "w różne strony". Musi on bowiem korelować wzajemnie:

- punkty matematyczne zbioru osnowy z ich obrazami w różnych kamerach;
- homologiczne obrazy poszczególnych obiektów o bardzo różnym kształcie i fakturze;
- obrazy poszczególnych obiektów z ich geometrycznymi reprezentacjami (tj. bryłami zbudowanymi z punktów i linii), gdyż z jednej strony tego typu dane stanowią część wymienionych wcześniej zbiorów, z drugiej zaś ta operacja i te zbiory stanowią będą podstawowe narzędzie przy wykonywaniu dalszych zadań.

Wydaje się, że dla lepszego uporządkowania warto wyróżnić dwa różne poziomy korelacji:

1. Poziom pierwszy (uproszczony), na którym brane są pod uwagę jedynie punkty, oznaczone ściśle określonymi sygnałami jednego lub kilku kształtów. Zdolny do tego system musi "tylko" wyszukać i rozpoznać odpowiednie sygnały, przetworzyć je na reprezentacje matematyczne (tj. nadać współrzędne wyinterpolowanym środkom sygnałów), opatrzyć identyfikatorem i przesłać do dalszej obróbki przez "fotogramteryzną" część oprogramowania.

Poziom ten może być wystarczający do opisu tła (tj. utworzenia zbioru osnowy pierwotnej i zagęszczonej, i to zarówno w postaci matematycznej, jak i w postaci syntetycznego zapisu płaszczyzn obrazowych), może wystarczyć także przy obsłudze taśmy, na której pojawić się będą wyłącznie obiekty z naturalnymi sygnałami (np. część maszyn z nawierconymi otworami), i na tym koniec.

2. Poziom drugi (pełny), umożliwiający korelację obiektów niesygnalizowanych, a więc w pewnym sensie dowolnych. Byłoby to zagadnienie znane w fotogrametrii od lat pięćdziesiątych (czyli automatyczny korelator obrazu), gdyby nie pewne "ale":

- w niektórych zastosowaniach obiekty mogą po prostu nie mieć faktury (np. detale maszyny), a ponadto wszelki ruch, nawet w równomiernie oświetlonej przestrzeni, musi powodować znaczne różnice jasności obiektów;
- przy zróżnicowanym i zmiennym położeniu obiektów względem kamer wystąpią pola martwe, czyli nie dające się skorelować strefy nieciągłości;
- najczęściej obraz półtonowy i tak trzeba będzie zgeometryzować, aby móc przejść do syntetycznego opisu obiektu.

Rozwiązaniem alternatywnym dla klasycznej korelacji mikrofakturowo-półtonowej będzie więc poprzedzanie korelacji klasyfikacją, czyli zadaniem dobrze znanym w kręgach teledetekcji. Tyle że znów:

- tym razem będzie to klasyfikacja głównie konturowo-geometryczna, a nie energetyczno-tonalna;
- będzie ona wykonywana w przestrzeni a nie na powierzchni terenu, a więc nasz system musi być na tyle elastyczny, aby "nie zgłupiał", jeśli otrzyma np. dwa obrazy prostopadkościanu z tak różnych punktów, że tylko jedna ściana (a może jedna krawędź?) odwzorowana jest na wszystkich obrazach.

Najlogiczniejszą drogą rozwiązania tak postawionego zadania wydaje się być:

- transformacja obrazu półtonowego na konturowy, tj. złożony wyłącznie z punktów i linii;
- transformacja obrazu konturowego na cyfrowy (tj. na współrzędne);
- korelacja cyfrowych reprezentacji obrazów i ewentualnie wtórna klasyfikacja obiektów.

Alternatywa ta nie przekreśla wcale korelacji tradycyjnej, która, szczególnie po pewnym jej uelastycznieniu, może się okazać wartościowsza dla obiektów nieregularnych o bogatej fakturze itp.

Wydaje się, że główne problemy zostały już naświetlone - dalsze szczegóły zostawmy fachowcom lub przyszłym fachowcom. Myślę, że można również pominąć rozważania nt. banku danych - jego niezbędne struktury ujawnią się w jakimś stopniu same przy rozważaniach zadań systemu.

Faza II - efektywna praca

Opis działań systemu rozwijać będziemy stawiając mu kolejno coraz to bardziej skomplikowane zadania i szkicując zasady ich wykonywania.

1. Kontroluj "status quo", czyli czy nic się nie dzieje. Jest to zadanie banalne i właściwie przedfotogrametryczne. Wystarczy ciągle porównywanie obrazów z kolejnych kamer z wziętymi z pamięci pełnymi obrazami źródłowymi (stanu wyjściowego). No i przesłanie umówionego sygnału w przypadku stwierdzenia zmiany stanu. Zadać trzeba jedynie o ustalenie sensownego poziomu szumów, gdyż inaczej najdrobniejsza zmiana napięcia sieciowego wystarczy dla uruchomienia systemu alarmowego.

2. Zlokalizuj zmianę stanu; zadanie równie banalne, lecz już fotogrametryczne. System wykonuje ciągle zadanie 1, a na sygnał zmiany stanu reaguje korelacją homologicznych obrazów zmieniających się punktów czy obiektów oraz wcina je, podając w efekcie ich pozycję (a więc współrzędne X, Y, Z).

3. Określ trajektorię ruchomego obiektu; zadanie także banalne, lecz już fotogrametryczno-flzyczne. System wykonuje ciągle zadanie 2, rozbudowując na bieżąco tablicę drogi punktu (punktów) obiektu. Dla obiektów małych dolicza ewentualnie prędkość i przyspieszenie, dla obiektów większych rozszerza zadanie o obliczenie pozycji kątowej metodą transformacji przez podobieństwo, przy czym zbiór ich parametrów stanowić będzie syntetyczny opis trajektorii, a odpowiednie przyspieszenia też doliczyć łatwo.

4. Sklasyfikuj "intruza", tj. nowy obiekt niepunktowy.

Na wstępie zauważmy, że wykonalność tak postawionego zadania uwarunkowana jest wcześniejszym wyposażeniem systemu w klucz rozpoznawczy, czyli wzorce klasowe wszystkich dopuszczalnych obiektów oraz w metodykę klasyfikacji.

Zbiór wzorców klasowych musi zawierać:

- wystarczającą ilość informacji dla zidentyfikowania każdej klasy w każdej dopuszczalnej pozycji obiektu;
- poziom szumów w obrębie klas (uwaga - musi tu być uwzględniona geometryczna dokładność systemu);
- zapewne i klasę "śmietnik", zdolną pomieścić obiekty, nie dające się z jakichś powodów sklasyfikować.

Można sobie wyobrazić dwa sposoby zabudowania takiego zbioru:

- geometryczny (cyfrowy), czyli załadowanie do komputera cyfrowego opisu cech geometrycznych (a może nie tylko? - może jedną z cech byłby np. kolor?) wszystkich klas;
- eksperymentalny, czyli pokazanie systemowi kolejno prototypów obiektów każdej klasy w taki sposób, aby system sam wytworzył sobie syntetyczne obrazy wszystkich wzorców klasowych w konwencji, używanej przy ich późniejszym rozpoznawaniu.

Wybór sposobu zależy zarówno od "umiejętności" systemu, jak i od charakteru obiektów.

Przy całym bogactwie życia nie podejmuję się próby sformułowania jakichś ogólnych zasad klasyfikacji. Ograniczając się natomiast do pomieszanych na jednej taśmie różnych wytworów przemysłu maszynowego można by zorganizować ich klasyfikowanie metodą heurystyczną (tj. prób i błędów) przy użyciu transformacji jako narzędzia, dopasowującego wzorce klasowe do aktualnej pozycji klasyfikowanego detalu.

5. Przejmij sterowanie procesem technologicznym, czyli zacznij wreszcie robić coś pożytecznego. Zadanie znowu banalne, gdyż wystarczy:

- przypisać każdej klasie obiektów właściwe operacje,
- podłączyć do komputera systemy sterujące chwytaków, narzędzi itp., aby system przejął rzeczywistą kontrolę procesu technologicznego.

I w ten sposób naszkicowaliśmy umiejscowionego robota, zdolnego do obsługi taśmy opierając się na samodzielnie gromadzonych informacjach wizualno-metrycznych. I nie musi to być tylko fantazja. H. Haggren wspomina o działającym w Finlandii systemie, obmierzającym pnie drzewne na podejściu do traków i tak sterującym procesem ich przecierania, aby zminimalizować ilość odpadów. Rozumiem, że po określeniu kształtu pnia musi nastąpić jego obrót do optymalnej pozycji oraz wybór najkorzystniejszej ścieżki naprowadzania. Oczywiście proces podejmowania decyzji jest tu znacznie bardziej skomplikowany, niż rozważany dotychczas. Zbiór obiektów nie może tym razem być skwantyfikowany, a więc zamiast klasyfikacji pojawia się optymalizacja w ciągłym, tj. bezklasowym obszarze.

6. Poruszaj się bezkolizyjnie po zamkniętej przestrzeni, zastawionej pewną liczbą stałych i ruchomych urządzeń.

Wykluczamy od razu przypadek pomieszczenia zorganizowanego tak, że wszystkie konieczne trasy są wolne od przeszkód - magnetyczne ścieżki w podłodze i czujnik w podwoziu robota załatwią sprawę prosto i skutecznie (technika ta badana jest od lat pod kątem automatyzacji ruchu samochodowego).

Na "naszą" część sterującą ruchomego robota składać się muszą: źródło energii, komputer i kamera (tylko jedna, jeśli dopuścimy albo dowolne obroty robota, albo ściśle określone obroty kamery względem robota).

Dla zapamiętania pozycji trwałych elementów otoczenia wystarczy założyć w nim dwa punkty osnowy, "oprowadzić" robota po hali z zapisaniem pewnej liczby obrazów, no i rozwiązać sieć. Przy niezmiennych wysokościach robota i urządzeń będzie to prosta dwuwymiarowa sieć pęków w płaszczyźnie XY. Znakomicie uprościmy zarówno proces poznawania otoczenia, jak i późniejszą pracę systemu, sygnalizując unikalnymi znakami (różne kształty czy barwy sygnałów, może nawet grupy punktów) nieruchome urządzenia, gdyż pozwoli to na:

- korelację wyłącznie sygnałów, a więc błyskawiczną;
- wprowadzenie pozycji tychże urządzeń oraz ścian hali, czyli zastąpienie poznawania otoczenia załadowaniem odpowiedniego zbioru danych.

Jeśli zawartość hali zostałaby ograniczona tylko do urządzeń stałych, to wystarczyłoby podanie (lub samodzielne określenie) wymiarów poszczególnych urządzeń jako niedostępnych otoczeń, aby wyposażyć robota w pełną wiedzę o dostępnej dlań przestrzeni. Przewidując pojawienie się nowych przeszkód, musimy natomiast zadbać jeszcze o śledzenie pierwszego planu na kierunku aktualnie wykonywanego ruchu oraz określania pozycji przeszkód leżących wzdłuż trasy. Zauważmy, że posiadanie jednej kamery nie jest przeszkodą, albowiem porusza się ona wraz z robotem, czyli może wykonywać obserwację ciągłą (coś w rodzaju zdjęć szeregowych, tyle że przy dziwnej dla

fotogrametrów orientacji kamery). Przypomnijmy wreszcie, iż dynamiczne określanie pozycji własnej polegać będzie na wykonywaniu wcięcia wstecz (płaskiego oczywiście).

Myślę, że rozważania nt. sposobów organizowania użytecznej pracy ruchomego robota możemy sobie darować.

NIEKTÓRE SPOSOBY WALKI O CZAS

Zainstalowanie w dynamicznym systemie fotogrametrycznym nawet bardzo szybkiego komputera nie zwalnia projektantów i programistów od obowiązku minimalizacji czasu każdej operacji. Ilość przetwarzanych informacji jest przecież olbrzymia, a wytworzone sygnały sterujące muszą zdążyć do narzędzi na tyle szybko, aby nie zwolnić ruchu taśmy, czy w inny sposób nie opóźnić procesu technologicznego.

Jeden ze sposobów oszczędzania czasu już poznaliśmy - jest nim korelacja syntetycznych a nie półtonowych obrazów otoczenia. Poznajmy więc i niektóre inne.

Co można np. zrobić gdy, tak jak we wspomnianym wyżej procesie sterowania obróbką drewna, obiekt nie da się zastąpić bryłą geometryczną o skończonej liczbie krawędzi i wierzchołków, a więc korelować możemy tylko obrazy półtonowe?

Okazuje się, że ten czasochłonny etap można łatwo skrócić, a nawet wyrzucić. Gdybyśmy bowiem oświetlili pień przez negatywową siatkę kwadratów (tj. jasne linie na ciemnym tle), to do skorelowania pozostałby tylko jakiś nieznacznym procent powierzchni pnia. Oświetlając wędrujący pień jedną tylko płaską wiązką błyskającego co chwilę światła ograniczylibyśmy całą korelację tylko do tejże linii. Numeryczny model pnia powstawałby wówczas krokowo w miarę jego przesuwu, a stałość relacji przestrzennych między wiązką i prowadnicami przyspieszyłaby dalej fotogrametryczną (w sensie klasycznym) część obliczeń. Jeśli wreszcie linia ta byłaby "rysowana" przez ruchomy punkt świetlny (kiwający się laser czy tradycyjne źródło światła z soczewką typu kondensatora), to korelacja nie jest potrzebna w ogóle - w danym momencie na obu obrazach widoczny jest tylko jeden punkt obiektu! Oczywiście ten ostatni wariant wymaga częstotliwości odczytywania obrazów wyrażalnej raczej w jednostkach czasu komputerowego niż systemów wideo.

W tym momencie nasuwa się natychmiast następny sposób oszczędzania czasu - kadrowanie obrazu (chyba dobry odpowiednik angielskiego "windowing"). Jeśli bowiem dzieje się coś tylko w bardzo ograniczonym wycinku obrazu rejestrowanego przez nieruchomą kamerę, to jaki jest sens w mieleniu całej

reszty? Tak więc tylko proces śledzenia status quo (bardzo szybki w przetwarzaniu, gdyż polegający na pozycyjnym odejmowaniu intensywności obrazu wyjściowego od aktualnego) wymaga obróbki całych obrazów - wszystkie dalsze etapy przetwarzania należy natychmiast ograniczyć do obszaru zmian, co najwyżej z jakąś minimalną otoczką. No a już przy wspomnianym oświetleniu wędrującą wąską wiązką wyszukuje się tylko jeden jedyny punkt!

Następnym sposobem albo alternatywnym względem kadrowania, albo doskonale go uzupełniającym, może być praca w płaszczyznach rdzennych.

Wiadomo, że konkretny promień rzutu jednego obrazu wraz ze środkiem rzutów drugiego wyznaczają płaszczyznę rdzenną, ta z kolei wyznacza na drugim obrazie promień rdzenny, na którym znajdzie się poszukiwany punkt. Tak więc jeśli jeden z obrazów uznamy za wiodący, to natychmiast po wybraniu na nim konkretnego punktu możemy szukać punktów jemu homologicznych na odpowiednich promieniach rdzennych zamiast na całych obrazach. Odpowiedni proces przeszukiwania można zorganizować wg jednego z następujących wariantów:

- wyznaczyć punkty przecięcia kolejnych linii $x = \text{const}$ lub $y = \text{const}$ przez obliczony promień rdzenny i sprawdzać poziom energetyczny odpowiednich pikseli (oczywiście ze względu na odstępki pikseli promień rdzenny musi tu mieć pewną grubość);
- jeszcze na etapie przygotowawczym przekształcić oryginalne siatki prostokątne obrazów na siatki bazujące na promieniach rdzennych, i dalej już tylko na nich pracować;
- staranna orientacja pary kamer do przypadku normalnego prowadzi do równoległości promieni rdzennych, a identyczna odległość obrazu również do ich równoodległości - mamy więc prosty sposób na to, aby linie $y = \text{const}$, były zarazem promieniami rdzennymi.

Oczywiście zagadnienie skomplikuje się przy systemie, mającym więcej niż dwie kamery - każdy z obszarów musiałby mieć wówczas tyle wtórnych struktur rdzennych, do ilu stereogramów wchodzi. Na ogół jednak uda się zapewne wyodrębnić jakieś rozłączne pary (najczęściej zapewne jedną tylko) o największym ciężarze gatunkowym, a więc godne zorientowania wg wariantu ostatniego, a dla rzadziej występujących par wybrać któryś z wariantów poprzednich.

Jeszcze innym sposobem oszczędzania czasu może być wykorzystanie kąta prostego, zmaterializowanego na mierzonym przedmiocie i odpowiednio ustawionego względem tegoż przedmiotu (np. trzy wierzchołki jednej ze ścian prostopadłościanu, a jeszcze lepiej - trzy podobnie rozmieszczone sygnały). Jeśli odpowiednim punktom przypiszemy współrzędne: $(0, 0, 0)$, $(a, 0, 0)$, $(0, b, 0)$, to kąty orientujące przedmiot możemy obliczać oddzielnie bardzo prostymi wzorami, zamiast łącznego ich wyznaczania z odpowiedniego układu równań.

Na zakończenie wreszcie przypomnienie najbardziej oczywistego ze wszystkich sposobów oszczędzania czasu - wykorzystywania w dynamicznych opracowaniach tylko niezbędnej liczby zdjęć (a więc jednego lub dwóch w zależności od chwilowego rozwiązywanego zadania). W etapie wstępnym mieliśmy nieograniczony czas na przygotowanie systemu do pracy, system o wielu kamerach mogliśmy więc zorientować przez łączne wyrównanie. Teraz czasu jest mało, a więc należy wykorzystywać tylko te kamery, które zapewniają danemu obszarowi najwyższą dokładność. Może nawet byłoby celowe wstępne przyporządkowanie wszystkich interesujących wycinków otoczenia optymalnie usytuowanym kamerom (parom kamer) oraz wstępne zorganizowanie zasad "podawania" obiektu kamerom (parom) sąsiednim.

UWAGI KOŃCOWE

Ciekawe rzeczy dzieją się w świecie, prawda?

Jeden tylko problem mnie męczy - czy to jeszcze my, czyli fotogrametria, czy to już całkiem inna dziedzina. I chyba jednak inna - sztuczna inteligencja, czyli jeden z najsilniej obecnie rozwijanych kierunków informatyki, teorii systemów czy jakiejś innej dziedziny wiedzy, dla mnie trochę tajemnej.

Ale to nie znaczy, że wolno nam stać z boku i patrzeć, jak inni męczą się nad problemami, które my rozumiemy, rozwiązujemy i czujemy. Powinniśmy się po prostu włączyć tam, gdzie nad nimi pracują.

LITERATURA

- [1] *El-Hakim S.F.*: A Photogrammetric Vision System for Robots.
- [2] *El-Hakim S.F.*: A Real-Time System for Object Measurement with CCD Cameras.
- [3] *Haggrén H.*: New Vistas for Industrial Photogrammetry
- [4] *Haggrén H.*: Real-Time Photogrammetry as Useful for Machine Vision Applications.
- [5] *Hughes R.C.*: Enhanced Single Camera Photogrammetry Algorithms for Real-Time Control Applications.
- [6] *Luhmenn T.*: Automatic Point Determination in a Reseau-Scanning System.
- [7] *Pinkney H.F.L., Perratt C.I.*: A Flexible Machine Vision Guidance System for 3-Dimensional Control Tasks.

- [8] Real R.R.: Components for Video-Based Photogrammetry of Dynamic Processes.
- [9] Real R.R.: Digital Processing of Dynamic Moire Imagery as an Aid in Scoliosis Screening.
- poz. 1, 3 i 9 [w:] International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXV Part A5 - Rio de Janeiro 1984.
- poz. 2, 4, 5, 6, 7, 8 [w:] International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXVI part 5 - Ottawa 1986.

Recenzent: Doc. dr inż. Adam Linsenbarth

Wpłynęło do Redakcji 6.05.1988 r.

A NEW IMAGE OF REAL-TIME PHOTOGRAMMETRY

S u m m a r y

The present state, possible applications and development trends of real-time photogrammetry is reviewed in the paper. Moreover, the attempt is made to systematize the variety of not only already known approaches, but logically predictable ones, too.

NEUE BERECHNUNGEN DYNAMISCHER PHOTOGRAMMETRIE

Z u s a m m e n f a s s u n g

In diesem Artikel wurde eine moderne Registrier- und Untersuchungskonzeption der dynamischen Erscheinungen in der reellen Zeit, mittels photogrammetrischen Methoden vorgestellt.

Die o.g. Methode kann bei der Steuerung der technologischen Prozesse, die eine laufende Analyse der Vorgänge mit variablen geometrischen Parametern erfordern, verwendet werden.