

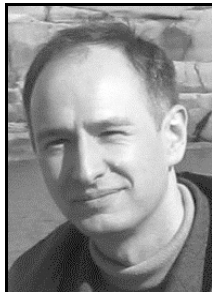
**Jacek KĘSIK**

INSTYTUT INFORMATYKI, WEil, POLITECHNIKA LUBELSKA,  
ul. Nadbystrzycka 36 b, 20-618 Lublin

## Projekt systemu skanowania obiektów 3D, z wykorzystaniem platformy obrotowej i układu stereowizyjnego

Dr inż. Jacek KĘSIK

Dr inż., adiunkt w Instytucie Informatyki Politechniki Lubelskiej, zajmuje się grafiką komputerową, przetwarzaniem obrazu ukierunkowanym na stereowizję, projektowaniem aplikacji Web sterowanym modelem (WebML).



e-mail: kesik@cs.pollub.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycję budowy średnio kosztowego skanera o zwiększonej precyzji. Układ wykorzystuje metodę stereowizyjnej analizy obrazu obiektu obracanego wokół swojej osi. Cechą szczególną układu jest wykorzystanie, zaprojektowanej i zbudowanej przez autora, sterowanej komputerowo obrotowej platformy, o wysokiej rozdzielczości kąta obrotu i zapewnionej powtarzalności nastaw. Taka konstrukcja umożliwia wielokrotne skanowanie tego samego obszaru obiektu z różnymi parametrami kamer i oświetlenia, co owocuje wyższą szczegółowością uzyskanego modelu.

**Słowa kluczowe:** skaner 3D, stereowizja, układ obrotowy.

### Project of the 3D scanning system utilizing stereovision and rotational platforms

#### Abstract

The possibility of quick 3D model generation of real-life objects is a widely used aid in 3D design. The 3D scanners, which can acquire data needed for the generation of a 3D model, can be divided into several categories, from which not all are commonly available because of high costs. The example of such a group is a scanner conducting precise scans of small objects. This paper presents a design proposition of building a middle-cost 3D scanning environment, capable of doing 3D scans in a variety of ways and with different precision. The set generally utilizes a stereovision method of 3D data acquiring, of an object being rotated around its axis. The novelty is utilizing self-designed, computer operated rotational platforms. The platform main features are the high resolution of angle adjustments and its repeatability. The platform can be setup in different ways, giving the ability to test different scan methods and algorithms, thus leading to increase in the model accuracy. The scanning environment angle setup repeatability allows also the utilization of scan algorithms, averaging several scans of the same object area.

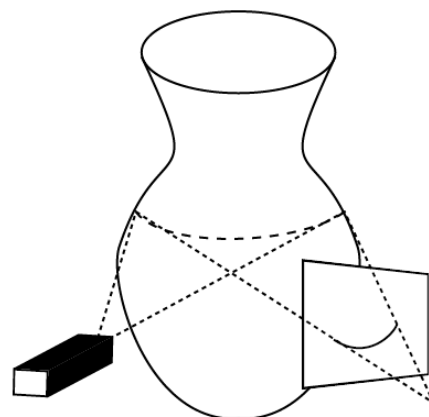
**Keywords:** 3D scanner, stereovision, repeatable angle setup platform.

### 1. Wstęp

Skanowanie 3D jest ogólnie uznana formą pozyskiwania obiektów trójwymiarowych do celów wizualizacyjnych. Obecne układy skanowania można podzielić na kilka grup w zależności od sposobu pozyskiwania wyników jak i kosztów oraz zastosowania. Do skanerów 3D zaliczają się urządzenia wykonujące pomiary w sposób inwazyjny (dotyk czy nawet krojenie na plastry), urządzenia prześwietlające obiekty oraz urządzenia bazujące na odbiciach, do których zaliczają się skanery optyczne. Te z kolei można podzielić na zaawansowane układy o wysokiej rozdzielczości, stosujące zestaw specjalizowanych kamer i układów skanujących oraz tańsze rozwiązania stosujące proste kamery internetowe i zestawy wzorców kalibracyjnych. Ze względu na stosowane układy wspomagające można wyróżnić układy pasywne bądź stosujące oświetlenie światłem strukturalnym lub laserem. W obu

przypadkach możliwe jest zastosowanie plansz kalibracyjnych. Oczywistym jest, że zaawansowane układy oferują znacznie wyższą dokładność pozyskanych skanów w stosunku do swych prostszych odpowiedników [1].

Zasada działania tego typu skanerów opiera się na triangulacji przecięcia widoków na punkt obiektu z kamer stereowizyjnych lub też widoku przecięcia obiektu z linią oświetlenia strukturalnego. Wyznaczając półproste przechodzące przez punkty matrycy aparatu będące uwidocznieniem przecięcia z obiektem płaszczyzny np. liniowego lasera można odtworzyć położenie w przestrzeni punktów obiektu uwidoczniionych w poszczególnych pikselach obrazu.



Rys. 1. Skaner optyczny 3D z laserem liniowym [2]  
Fig. 1. Optical 3D scanner with line laser [2]

Pojedynczy skan obiektu 3D może zawierać błędy i braki widoczne na rys. 2. Są to np. szumy i złe dopasowania wynikłe czy to z powodu niedostatecznego oświetlenia czy niedokładności układu akwizycji obrazu, przekłamania w kształcie obiektu ze względu na niedokładną kalibrację układu czy jego zbyt małą rozdzielczość, wreszcie braki spowodowane niemożnością zeskanowania danego obszaru.



Rys. 2. Pojedynczy skan obiektu, zawierający błędy i braki  
Fig. 2. Single scan of an object, with errors and gaps

Niezależnie więc od zaawansowania układu, proces skanowania składa się z przynajmniej kilku osobnych skanów powierzchni obiektu powtarzanych dla poprawy jakości czy będących widokami z różnych stron. Uzyskane wyniki, chmury punktów 3D, są następnie dopasowywane i łączone odpowiednimi algorytmami, a na ich podstawie generowana jest siatka trójkątów. Jakość procesu samego skanowania jak i dopasowania poszczególnych kawałków jest uzależniona od powtarzalności czy to obrotu obiektu, czy kolejności przesuwania np. promienia lasera. Gdy można uzyskać wysoką powtarzalność np. położenia lasera, możliwe jest wprowadzenie algorytmów budujących model na podstawie uśredniania danych z wielu serii. Tak wysoką precyzję oferują tylko drogie, komercyjne rozwiązania. Algorytmy uśredniające (o ile są wprowadzone) są jednak integralną częścią oprogramowania takiego skanera i nie ma możliwości ich modyfikacji do własnych potrzeb. Układy zapewniające powtarzalność procesu skanowania są w takich rozwiązaniach zintegrowane w postaci samodzielnego skanera, również uniemożliwiając testowanie różnorodnych konfiguracji metod skanowania.

Gdy powtarzalność skanowania nie można zapewnić, stosowane są różnorodne układy kalibracji, najczęściej w postaci zestawu plansz, na tle których skanowany jest obiekt. Wiąże się to z koniecznością tworzenia plansz dopasowanych do obiektów różnych rozmiarów.

Projekt i budowa układu umożliwiającego zapewnienie powtarzalności ruchów obrotowych obiektu, promienia skanującego czy kamery jest przedstawiony w dalszej części pracy. W założeniach autora było zbudowanie średnio kosztowego układu pozwalającego na łatwą zmianę konfiguracji i wymianę elementów optyki czy wspomaganie triangulacji.

Zaprezentowany układ pozwala na kompensację błędów skanowania technikami odpowiednio dobranymi do danego przypadku. Można zeskanować powtórnie dany obszar stosując większą rozdzielczość zmian kąta, zmienić kąt patrzenia kamery na obiekt, czy po prostu obrócić obiekt o zadany kąt. W każdym przypadku możliwy jest powrót do wcześniejszej pozycji i wybór innej nastawy lub techniki w przypadku niezadowolających wyników. Założeniem jest również minimalizacja konieczności ingerencji operatora w proces skanowania z powtórzeniami.

## 2. Projekt układu skanera

Z założenia nie jest konieczne zapewnienie dużej precyzji i powtarzalności wszystkich nastaw układu. Dopasowanie położenia kamer czy źródła światła strukturalnego jest dokonywane raz dla jednego umiejscowienia skanera i może być z powodzeniem dokonane ręcznie. Raz rozstawiony układ może wykonywać skany wielu obiektów o podobnych gabarytach. Istotnymi z punktu widzenia powtarzalności są kąty obrotu kamer i źródeł światła. W przypadku źródeł światła strukturalnego duże znaczenie ma również zapewnienie wysokiej rozdzielczości zmian kąta skierowania na obiekt.

Drugim aspektem jest umożliwienie automatyzacji całego procesu. Sterowanie z poziomu programu skanującego, zarówno akwizycją obrazu jak i położeniem elementów skanera jest czynnikiem niezbędnym do zapewnienia efektywnego wykorzystania możliwości skanera. W rezultacie sterowany komputerowo ruch układu można ograniczyć do zmian kąta obrotu, przy założeniu możliwości obracania dowolnym z trzech postulowanych obiektów.

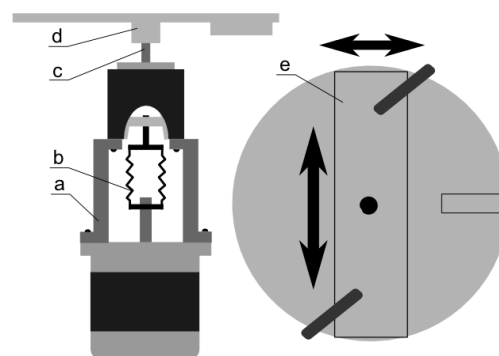
Dobrą powtarzalność i automatyzację zmian kąta obrotu można uzyskać stosując silnik krokowy. Jego główną zaletą jest możliwość dokładnego sterowania w pętli otwartej. Eliminuje to konieczność budowy sprzężenia zwrotnego - informacji o położeniu z wykorzystaniem kosztownych urządzeń, takich jak enkodery optoelektroniczne. Pozycja wyznaczana jest na podstawie zliczania impulsów wejściowych. Potencjalne niebezpieczeństwo wystąpienia gubienia kroków przy nadmiernym obciążeniu silnika można uznać w tym przypadku za pomijalne ze względu na poruszanie niestawiających oporu obiektów o niewielkiej wadze.

Skokowe zmiany nastaw kąta są wskazane przy digitalizacji powierzchni obiektu. Wybrany do budowy układu silnik 5-cio fazowy oferuje krok obrotu  $0,72^\circ$  [3]. Rozdzielczość ta nie jest wystarczająca dla przemieszczania światła strukturalnego, przykładowo: obrót o jeden krok emitera lasera liniowego spowoduje przesunięcie linii lasera o 1,26 cm na obiekcie znajdującym się w odległości 1 metra od emitera. Problem został rozwiązany przez zastosowanie przekładni 1/100, zmniejszającej krok do  $0,0072^\circ$  i redukującej przesunięcie do 0,1 mm. Tak wysoka rozdzielczość jest wskazana w dobie wykorzystywania aparatów cyfrowych zapisujących 2-5 tysięcy linii skanowania poziomego na jednym obrazie. Nie bez znaczenia jest tu też skala obiektu, gdzie mały obiekt wymaga dużej szczegółowości, podczas gdy dla dużego obiektu, skanowanego z większej odległości, znaczna długość promienia obrotu wymusza wysoką rozdzielczość zmian kąta.

Zastosowanie przekładni może wprowadzić do układu niepożądane luzy, utrudniające realizację wielokrotnego powtarzania konkretnego odcinka skanowania. Zdecydowano się na zastosowanie przekładni harmoniczej, minimalizującej ten problem [4].

Układ badawczy ma zapewniać możliwość wykorzystania dowolnych konfiguracji kamer, obiektu i oświetlenia. Wiąże się to z problemem montowania tych elementów w układzie tak, aby układ współrzędnych kamery był zgodny z osiami obrotu. Zdecydowano się na wprowadzenie obrotowego stołu montażowego, do którego mocowana jest kamera lub na którym stawiany jest obiekt. Po uzyskaniu zgodności położenia osi elementu z osią obrotu układu mocowany jest on do stołu obrotowego.

Rys. 3 przedstawia konstrukcję głowicy. Przekładnia jest przymocowana do korpusu silnika krokowego za pomocą odpowiedniego łącznika (a). Połączenie wału silnika z przekładnią jest zrealizowane za pomocą łącznika mieszkowego (b), niwelującego ewentualne niedokładności spasowania osi obu elementów. Na wale wyjściowym przekładni (c) zamocowany jest stolik montażowy (d). Jego konstrukcja przewiduje: postawienie obiektu „wolno” na stoliku, ustawienie i zamocowanie na stole aparatu posiadającego mocowanie statywowe (konstrukcja umożliwi również dopasowanie kamery posiadającej gniazdo przesunięte w stosunku do osi obiektywu, za pomocą przesuwnej płytki mocującej (e)), podłączenie emitera światła strukturalnego.



Rys. 3. Schematyczne przedstawienie konstrukcji głowicy układu  
Fig. 3. Schematics of the headset construction

Wykorzystanie wału wyjściowego przekładni, jako jedyne go elementu nośnego dla stolika obrotowego jest dopuszczalne przy założeniu, że umieszczane na stoliku urządzenia (aparaty fotograficzne, promienniki laserowe, itp.) są elementami kompaktowymi o wadze nieprzekraczającej 1kg. Tak niewielkie obciążenie nie będzie miało negatywnego wpływu na żywotność i dokładność przekładni.

Zdecydowano się również na budowę układu, jako zestawu dwóch niezależnych głowic pozycjonujących, każda z własnym statywem. Rozwiązanie takie daje swobodę wyboru dowolnej

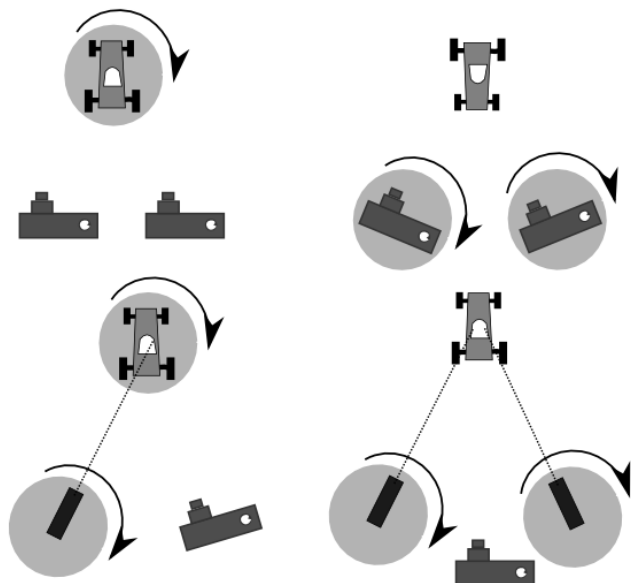
konfiguracji, w zależności od bieżących potrzeb badawczych. Typowe konfiguracje głowic przedstawiono na rys. 4.

Wspomniana powyżej rozdzielczość układu  $0,0072^\circ$  (50 000 kroków/obrót) jest wartością teoretyczną, nieuwzględniającą niedokładności układu. Błąd bezwzględny spozycjonowania głowicy został wyznaczony na podstawie parametrów elementów składowych układu.

Błąd nastawy pojedynczego kroku zastosowanego silnika krokowego  $B_s$  nie przekracza 5%, przy czym błąd ten nie kumuluje się przy wykonywaniu sekwencji kroków [5]. Zastosowana przekładnia redukuje ten błąd, ale wprowadza własny błąd  $B_p$ , zdefiniowany przez producenta, jako mniejszy niż 2,5 minuty kątowej na obrót. Możliwy błąd wprowadzany przez połączenie został uznany za pomijalnie mały. Obliczając błąd układu  $B_u$  według wzoru (1):

$$B_u = (B_s / 100) + B_p \quad (1)$$

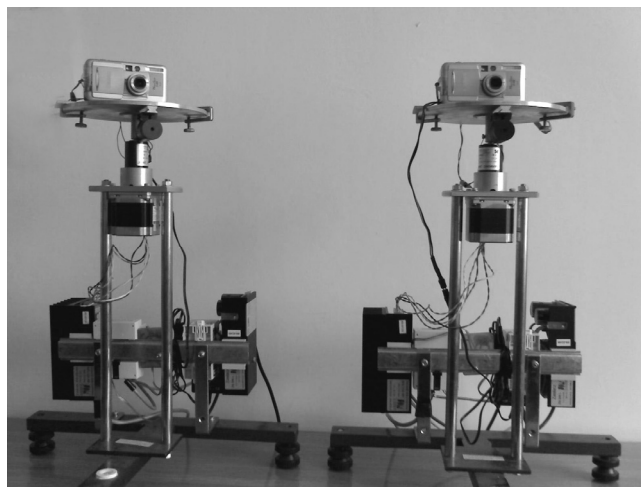
uzyskano wartość mniejszą niż 3 sekundy kątowe, czyli przesunięcie prążka światła w odległości 1m rzędu 0,01mm. Uznano więc, że układ nie wprowadza zauważalnych błędów podczas skanowania jednorobocznego, z pełną rozdzielczością.



Rys. 4. Możliwe konfiguracje proponowanego układu  
Fig. 4. Possible configurations of the proposed design

Dokładność nastaw pogarsza się, gdy wykorzystywana będzie opcja wielokrotnych powtórzeń skanowania pewnego obszaru. Jakkolwiek producent przekładni operuje w prospekcie pojęciem „zero backlash” (zerowy luz) [6], podana jest również wartość „repeatability” określająca maksymalny błąd spozycjonowania przy wykonywaniu serii odchyleń i powrotów do konkretnej pozycji [7]. Wynosi on mniej niż 1 minutę kątową, dając odchylenie prążka w odległości 1m nie większe niż 0,3mm. Tak niewielki błąd jest najczęściej pomijalny lub łatwy do skorygowania z wykorzystaniem algorytmów dopasowujących skany wynikowe; mogą być one znacznie mniej złożone.

Ostatecznie zbudowane zostały dwie bliźniacze głowice skrzętne, każda mogąca funkcjonować w dowolnym z trzech zastosowań. Rys. 5 przedstawia ukończone głowice ze zintegrowanym statywem i układem sterującym. Umieszczone na stolikach kamery i generatory promienia laserowego uwiadcniają sposób montażu tych elementów.



Rys. 5. Obrotowe platformy – główna część układu  
Fig. 5. Rotating platforms – the main part of the setup

### 3. Podsumowanie

Zaproponowany układ spełnia założenia stawiane na początku projektowania. Możliwość ustawienia w dowolnej konfiguracji pozwala na łatwe dobranie metody skanowania do aktualnej potrzeby. Zdolność do automatycznego powtarzania skanowania konkretnych regionów z zadawalającą dokładnością spozycjonowania, pozwala na korektę parametrów skanowania w jego trakcie. Taka korekta może być wykonana automatycznie na podstawie analizy uzyskanych wyników (nawet bez udziału operatora). Ingerencja operatora na tym etapie sprowadza się do ewentualnej ręcznej zmiany parametrów skanowania.

Możliwość uzyskania wielokrotnych skanów tego samego regionu dostarcza dane, które można wykorzystać do uzyskania modelu z uśrednionych wyników szczególnie trudnych do skanowania obszarów obiektu.

Postulat średnio kosztowności urządzenia zależy w głównej mierze od kosztów zakupu przekładni harmoniczných, dochodzących do kilkunastu tysięcy złotych. Dostępne są jednak znacznie mniej kosztowne modele (200-500\$), w tym wykorzystany w projekcie.

### 4. Literatura

- [1] Curless B., Seitz S.: Course on 3D Photography. Sigrath 2000.
- [2] Bernardini F., Rushmeier H.: The 3D Model Acquisition Pipeline. COMPUTER GRAPHICS forum, 21 (2002), n. 2.
- [3] EC Motion.: SECM566er Baureihe. [http://www.ec-motion.com/fileadmin/ecm/pdf/secm566\\_d.pdf](http://www.ec-motion.com/fileadmin/ecm/pdf/secm566_d.pdf)
- [4] Slatter R.: Weniger kann mehr sein. F&M. 04/2001.
- [5] Solarbotics.net. Industrial Circuits Application Note: Stepper Motor Basics. <http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf>
- [6] Harmonic Drive A.G.: Gesamtkatalog. [http://www.harmonicdrive.de/cms/blaetterkatalog/Blaetterkataloge\\_HarmonicDrive\\_20110309\\_inkl\\_UMS/DE\\_EN/blaetterkatalog/](http://www.harmonicdrive.de/cms/blaetterkatalog/Blaetterkataloge_HarmonicDrive_20110309_inkl_UMS/DE_EN/blaetterkatalog/)
- [7] Harmonic Drive A.G.: Engineering Data. [http://www.harmonicdrive.de/cms/upload/pdf/GK\\_2011\\_2012/de\\_en/gk-387-526.pdf](http://www.harmonicdrive.de/cms/upload/pdf/GK_2011_2012/de_en/gk-387-526.pdf), str. 21.