

Sposób skanowania przestrzeni roboczej obrabiarki CNC

Przedmiotem wynalazku jest sposób skanowania przestrzeni roboczej obrabiarki CNC, zwłaszcza przedmiotu obrabianego zamocowanego na obrabiarence, z wykorzystaniem optycznego skanera trójwymiarowego, kalibracji i transformacji danych.

Bezdotykowe optyczne metody pomiaru są coraz częściej wykorzystywane w przemyśle do zadań kontrolnych i inspekcyjnych oraz w inżynierii odwrotnej, gdy występuje konieczność zrekonstruowania elementu, dla którego nie jest dostępna dokumentacja techniczna. Pomiaru te stają się coraz szybsze, osiągają dokładność współczesnych obrabiarek CNC i pozwalają na częste lub ciągłe monitorowanie procesów wytwarzania oraz procesów montażowych, m.in. w branży samochodowej i lotniczej. Z opisu US20130278725A1 powszechnie znanymi urządzeniami są skanery światła strukturalnego, złożone z dokładnie zorientowanym względem siebie kamer i oświetlaczy. Obszar oświetlony światłem strukturalnym np. kodem Graya [US20130278725A1, US20130278725A1] lub niejednorodnym rastrem punktowym [US20170142393A1] jest obserwowany przez kamery usytuowane pod innym kątem niż projektor i na podstawie zarejestrowanych na obrazach zniekształceń struktury oraz przy użyciu powszechnie znanych metod geometrycznych (triangulacja, transformacje układów współrzędnych) wyznaczane są trójkoordynaty punktów reprezentujących powierzchnię skanowaną. Zmieniając pozycję skanera w przestrzeni możliwe jest zmierzenie przedmiotów o różnych gabarytach, różnym stopniu skomplikowania kształtu oraz zróżnicowanej szczegółowości detali. Łączenie skanów z dużą dokładnością musi odbywać się z wykorzystaniem punktów referencyjnych, tzw. markerów, naniesionych na skanowany obiekt lub umieszczonych w pobliżu tego obiektu. Wprawdzie istnieją metody łączenia skanów metodą lokalnego dopasowania chmur punktów (ang. *local best fit*), jednak mogą one skutkować błędami w przypadku np. brył obrotowych, czy obiektów o znacznym wydłużeniu i wymagają wielu skanów z dużym wspólnym obszarem pokrycia. Skaner można umieścić na statywie i ustawiać go manualnie lub zamocować na ramieniu robota przemysłowego, który może pełnić funkcję manipulatora ułatwiającego odtworzenie kolejnych położenia skanera podczas np. serii zaprogramowanych pomiarów. Teoretycznie znając dokładne przemieszczenie skanera w przestrzeni można wyznaczyć matematycznie relację pomiędzy niezależnymi skanami powierzchni, jednak w tym celu należy użyć bardzo dokładnych manipulatorów.

Dokładność robota przemysłowego jest niska (rzęd wielkości niższa niż współczesnych obrabiarek numerycznych) i nie może on być używany do pozycjonowania skanera w przestrzeni, a zatem w celu poprawy dokładności markery referencyjne naniesione na skanowany przedmiot są niezbędne.

Ze zgłoszenia patentowego P. 393943 znany jest sposób wyznaczania bazowego układu odniesienia dla programu obróbkowego lub pomiarowego wykorzystujący kalibrację stołu i przesyłanie danych do układu sterowania maszyny CNC, który charakteryzuje się tym, że po wykonaniu kalibracji względem ściśle ułożonego na maszynie, co najmniej jednego punktu charakterystycznego i powiązaniu systemu skanowania wizyjnego z maszynowym układem współrzędnych oświetla się światłem strukturalnym i skanuje się trójwymiarowo przedmiot umieszczony na stole maszyny wraz z otoczeniem. Źródłem światła strukturalnego może być na przykład projektor wyświetlający kod Graya lub prążki sinusoidalne. Uzyskane dane o położeniu wszystkich obiektów, w tym także wszelkich uchwytów mocujących przedmiot przesyła się do jednostki obliczeniowej, na przykład komputera PC. W jednostce obliczeniowej przekształca się, stosując fotogrametryczne procedury, dwuwymiarowy obraz na trójwymiarowe koordynaty. Otrzymaną chmurę punktów poddaje się znanym procedurom oczyszczania, na przykład odsumiania metodą analizy najbliższego otoczenia punktu ze zbędnych punktów i upraszcza się w procesie triangulacji. Wyselekcjonowane zostają krawędzie rzeczywiste przedmiotu przy pomocy znanych algorytmów, na przykład filtr Canny, Sobel, Prewitt, operator Robertsa w połączeniu z metodami fotogrametrii. Stosując znane metody translacji i rotacji macierzowych T , przekształca się bazowy układ współrzędnych, względem, którego zaprogramowany został wcześniej ruch narzędzia dla obróbki detalu, na nowy układ bazowy do obróbki lub pomiaru detalu. Zasadniczą niedogodnością rozwiązania jest konieczność określenia położenia skanera (tj. kamer i projektorów) względem układu maszynowego obrabiarki z wykorzystaniem dodatkowych punktów odniesienia, np. markerów. Punkty te muszą być zamocowane bardzo precyzyjnie na stole obrabiarki w znanej pozycji względem układu maszynowego obrabiarki, a także znanej względnej orientacji i od nich zależy dokładność bazowania przedmiotu obrabianego. Przedmiot obrabiany musi pozostać w tym samym położeniu względem markerów. Kamery i projektory po zamocowaniu na

obrabiarki są kalibrowane znanymi metodami, tzn. wyznaczone są ich parametry zewnętrzne względem markerów tworzących wzorzec kalibracyjny.

Według wynalazku EP 3108311 B1 znany jest sposób umiejscawiania procesu obróbki na obrazie wyświetlanym na żywo ze skalibrowanej kamery, zamocowanej stale przy urządzeniu obróbkowym. Kalibracja położenia kamery polega na powszechnie znanym sposobie obserwacji grupy punktów referencyjnych o znanym położeniu względem maszyny. Rozwiązanie według wynalazku umożliwia wykonanie projekcji procesu obróbki (rozumianej jako punkty generowane przez program obróbki) na obraz dwuwymiarowy przedstawiający podgląd przedmiotu obrabianego na żywo, a tym samym podgląd dla operatora poprawności wykonania elementu obrabianego. Ponieważ przedmiot obrabiany przemieszcza się w polu widzenia kamery, rozwiązanie wymaga, aby punkty referencyjne podczas ruchu maszyny były stale widoczne i na ich podstawie wyznaczana jest tzw. transformacja w przód oraz w tył dla każdego nowego obrazu z kamery. Rozwiązanie może być przeznaczone do kontroli obróbki dwu- oraz trójwymiarowej, jednak stale bazuje na płaskim obrazie i nie są pobierane żadne dane trójwymiarowe o geometrii przedmiotu obrabianego. Ponadto kalibracja jest uproszczona do obserwacji ruchu punktów na płaskich obrazach, z których wynika jedynie położenie kamery względem przedmiotu obrabianego, ale nie można tak określić struktury kinematycznej obrabiarki, w szczególności kierunku jej głównych osi posuwu czy obrotu. Zasłonięcie jednego z punktów uniemożliwia jakiegokolwiek pomiary i obserwację procesu.

Z opisu patentowego EP 2759822 B1 znane jest rozwiązanie polegające na wykorzystaniu laserowego czujnika do trójwymiarowych pomiarów rozkładu masy i do wyznaczania osi obróbki obrotowego przedmiotu obrabianego. Wspomniany czujnik laserowy zamocowany jest ruchomo względem przedmiotu obrabianego co umożliwia skanowanie powierzchni częściowo niewidocznych w jednym z ustawień czujnika. Z opisu wynika, że komputer zapisuje dane z czujnika pomiarowego oraz kąty obrotu przedmiotu obrabianego podczas skanowania. Nie jest jednak opisana procedura kalibracji położenia układu odniesienia do skanowania względem głównej osi obrotu mierzonego przedmiotu ani na jakiej podstawie skany częściowe są ze sobą łączone dla różnych ustawień czujnika. Z opisu nie wynika czy rozwiązanie stosowane jest bezpośrednio na obrabiarkach numerycznych oraz czy czujnik powiązany jest z

jakimkolwiek układem odniesienia w łańcuchu kinematycznym obrabiarki, w szczególności z maszynowym lub narzędziowym układem odniesienia. Z opisu wynika również, że oś wyznaczona na podstawie rozkładu masy przedmiotu obrabianego jest korygowana względem osi łożyskowej w sposób mechaniczny za pomocą środków regulujących, a zatem skan trójwymiarowy nie stanowi bezpośrednio danych do obróbki przedmiotu, w szczególności nie jest tworzona baza obróbki bezpośrednio na obrabiarce. Z opisu patentowego EP 3233366 B1 znane jest rozwiązanie polegające na zastosowaniu systemu wizyjnego do skanowania konturu przekroju poprzecznego na maszynie do laserowego cięcia rur i podłużnych profili o teoretycznie dowolnych kształtach i rozmiarach. System ten składa się z modułów skanujących zawierających przynajmniej jeden emiter laserowy oraz kamerę do obserwacji kształtu laserowego światła na powierzchni profili. W prezentowanym rozwiązaniu moduły skanujące mocowane są nieruchomo względem głowicy roboczej (lasera tnącego) i skanują wyłącznie w jednej płaszczyźnie poprzecznej do tego profilu. Najprawdopodobniej jest to płaszczyzna, w której dokonuje się projekcji laserowych prążków, jednak nie jest to wprost opisane. Moduły skanowania laserowego mogą poruszać się po tej płaszczyźnie razem z głowicą roboczą. Dodatkowo rozwiązanie umożliwia obrót wokół osi podłużnej elementu obrabianego co wynika z konstrukcji przedstawionego w przykładach urządzenia. System pozwala na wykrycie rzeczywistego położenia konturu profilu względem osi odniesienia (najprawdopodobniej osi obrotu profilu) co umożliwia korektę cięcia laserowego. Nie zostały opisane procedury kalibracyjne położenia modułów wizyjnych względem głowicy roboczej, a tym bardziej względem układu współrzędnych maszyny. Nie są znane również procedury łączenia kolejnych fragmentów zeskanowanego konturu podczas obracania profilu czy ruchu głowicy w poszczególnych kierunkach. Z opisu nie wynika, że urządzenie wykonuje skanowanie ciągłe powierzchni profilu, chociaż opisana konstrukcja maszyny umożliwia ruch skanera wzdłużnie i poprzecznie do profilu. Rozwiązanie takie jest bardzo uproszczonym sposobem skanowania geometrii, gdyż wymagałoby synchronizacji ruchu wzdłużnego i obrotu profilu względem nieruchomej głowicy tak aby kolejne uzyskane kontury były ze sobą dopasowane. Nie przedstawiono sposobu transformowania zeskanowanych danych ze skanerów tak, aby podczas dowolnej względnej zmiany położenia i orientacji skanerów i profilu dane te pasowały

do siebie i tworzyły model powierzchniowy profilu, a tym bardziej nie przedstawiono takiej procedury względem układu maszynowego czy narzędziowego.

Opis patentowy PL 226842 B1 przedstawia system bezkolizyjnej obróbki w obrabiarce CNC, wyposażonej w skalibrowany układ stereowizyjny zawierający co najmniej dwie kamery połączone z komputerem, który połączony jest z układem sterowania maszyny CNC, który charakteryzuje się tym, że skalibrowany układ stereowizyjny ma co najmniej trzy markery i identyfikator graficzny, usytuowane na obiektach kolizyjnych i co najmniej trzy markery i identyfikator graficzny, usytuowane na stole oraz co najmniej dwie kamery usytuowane tak, aby widziały obiekty kolizyjne znajdujące się na stole. System ma komputer wyposażony w bazę zawierającą dane o położeniu markerów na obiektach kolizyjnych oraz moduł, który ustala położenia obiektów kolizyjnych i przesyła informacje o nich do układu sterowania obrabiarki CNC. Baza zawiera modele obiektów kolizyjnych utworzone z wykorzystaniem projektora światła strukturalnego, który wyświetla światło strukturalne generowane przez komputer i tworzy z co najmniej jedną kamerą układu, albo dodatkową kamerą układ do skanowania trójwymiarowego. Projektor światła strukturalnego może być umieszczony w przestrzeni roboczej obrabiarki albo poza nią. Baza może także zawierać modele CAD obiektów kolizyjnych utworzone wcześniej poza układem.

Ze zgłoszenia patentowego P.403820 znany jest sposób obserwacji procesów roboczych podczas obróbki detali na obrabiarce CNC, wykorzystujący kamery, polegający na tym, że przy pomocy tablicy kalibracyjnej kalibruje się układ stereowizyjny składający się z co najmniej dwóch kamer połączonych z komputerem i wyznacza się pozycję oraz parametry optyczne każdej z kamer względem układu odniesienia do kalibracji, po czym tak skalibrowany układ stereowizyjny umieszcza się w obudowie obrabiarki tak, aby możliwa była obserwacja stołu obrabiarki oraz przedmiotu obrabianego z każdej z kamer. Następnie na stół nanosi się co najmniej trzy markery o ustalonej pozycji względem stołu obrabiarki w taki sposób, aby możliwe było wyznaczenie ich pozycji względem układu odniesienia obrabiarki w dowolnym położeniu stołu, po czym tworzy się pierwszy lokalny układ odniesienia związany z pozycjami tych markerów i względem niego, w dowolnym momencie obróbki, określa się orientację i położenie układu obrabiarki, wykorzystując znane metody przekształceń jednorodnych, na przykład translacje i rotacje macierzowe. Następnie przy pomocy

układu stereowizyjnego wyznacza się pozycje markerów względem układu odniesienia do kalibracji, tworzy się drugi lokalny układ odniesienia związany z pozycjami tych markerów. Względem drugiego układu lokalnego, tymi samymi metodami, określa się orientację i położenie układu odniesienia do kalibracji. Traktując pierwszy i drugi układ lokalny utworzony na markerach jako początkowy (zerowy) układ współrzędnych, wyznacza się położenie i orientację układu odniesienia do kalibracji względem układu odniesienia obrabiarki. Następnie wykonuje się zdjęcia przedmiotu obrabianego jednocześnie za każdej z kamer, które przesyła się do komputera, gdzie tworzy się dla każdej z kamer mapy głębokości i zapisuje w pamięci komputera. Następnie na podstawie znanego algorytmu warpingu obrazów i na podstawie uzyskanych map głębokości oraz danych z kalibracji kamer, tworzy się mapę głębokości dla kamery wirtualnej. Wirtualna kamera umieszczona jest w punkcie obserwacji nie pokrywającym się z położeniem kamer rzeczywistych, a jej obraz jest wynikiem operacji przekształcania obrazów z kamer rzeczywistych przy pomocy map głębokości. Na podstawie parametrów optycznych wirtualnej kamery zadanych przez operatora maszyny, otrzymanej mapy głębokości oraz za pomocą modelu projekcji tworzy się rzut koordynatów przestrzennych na dwuwymiarową powierzchnię sensora wirtualnej kamery, otrzymując żądany widok z wirtualnej kamery i wyświetlając go na ekranie komputera. Mapy głębokości dla każdej z kamer układu stereowizyjnego tworzy się przy pomocy znanych algorytmów detekcji punktów charakterystycznych. Przy ich pomocy wyznacza się pozycję każdego z punktów charakterystycznych przedmiotu obrabianego, na przykład krawędzi lub narożników, na powierzchni zdjęć wykonanych przez kamery układu stereowizyjnego, a następnie na podstawie danych z kalibracji kamer i stosując algorytm projekcji odwrotnej wyznacza się dla każdej z kamer głębokość każdego punktu charakterystycznego widocznego na zdjęciach. Mapę głębokości dla każdej z kamer układu stereowizyjnego można także stworzyć instalując na obrabiarce CNC projektor światła strukturalnego, który kalibruje się tymi samymi metodami i który wyświetla w przestrzeni roboczej maszyny CNC generowane przez komputer punkty charakterystyczne. Na podstawie danych z kalibracji kamer i projektora, znając geometrię wyświetlanego z projektora światła strukturalnego i obserwując jego przebieg na oświetlonym przedmiocie tworzy się mapę głębokości punktów charakterystycznych dla każdej z rzeczywistych kamer.

Wynalazek według opisu EP 3285961 B1 przedstawia sposób i urządzenie do pomiaru narzędzia i jego naprawczej obróbki ubytkowej po częściowym zużyciu lub podczas wytwarzania metodami addytywnymi. W celu pomiaru aktualnej geometrii narzędzia proponowane jest wykorzystanie skanera 3D, np. skanera laserowego, służącego do gromadzenia danych reprezentujących krawędzie i powierzchnie narzędzia. Proponowane jest wykorzystanie obrotowego uchwytu narzędziowego do obrotu narzędzia względem nieruchomego urządzenia pomiarowego lub też zastosowanie skanera pozycjonowanego względem uchwytu narzędziowego, co umożliwi dodatkowo pomiar pod różnymi kątami względem osi uchwytu narzędziowego. Nie został jednak opisany sposób pozycjonowania skanera względem maszyny. Z opisu wynika, że dane zebrane w postaci chmury punktów nie są powiązane z układem współrzędnych maszyny, na której wykonywany jest pomiar, np. frezarki, a trójwymiarowy skan służy jedynie do inspekcji stopnia zużycia narzędzia lub pomiaru narzędzia wykonanego metodą addytywną, gdzie kontur odniesienia dopasowywany jest do konturu wirtualnego modelu narzędzia. Przy wytwarzaniu nominalnego konturu narzędzia, metodą obróbki ubytkowej, kontur odniesienia jest przesuwany, obracany lub też skalowany względem wirtualnego modelu, dzięki czemu możliwy jest jak najmniejszy ubytek materiału. W opisie nie ma dokładnego wskazania docelowej maszyny, na której można zastosować pomiar. Ze względu na brak powiązania operacji z systemem sterowania maszyny rozwiązanie jest uniwersalne, a jednocześnie nieskomplikowane w odtworzeniu.

Problemem technicznym, który rozwiązuje sposób według wynalazku jest powiązanie, poprzez odpowiednie procedury kalibracyjne, układu urządzeń optycznych tworzących skaner trójwymiarowy z łańcuchem kinematycznym maszyny CNC oraz wyznaczenie nowych położeń i orientacji tego skanera wyłącznie na podstawie odczytywanych zmian struktury kinematycznej (przemieszczeń i obrotów korpusów obrabiarki) w celu dokonywania wielokierunkowego trójwymiarowego pomiaru geometrii przedmiotów w przestrzeni roboczej obrabiarki.

Sposób skanowania przestrzeni roboczej maszyny CNC, według wynalazku, polegający na kalibracji, trójwymiarowym skanowaniu i transformacji uzyskanych po skanowaniu współrzędnych punktów zeskanowanych powierzchni, charakteryzuje się tym, że polega na powiązaniu układu trójwymiarowego skanera z układem kinematycznym maszyny CNC poprzez procedurę kalibracyjną. Procedura kalibracyjna

polega na wyznaczeniu na elemencie, do którego mocuje się przedmiot obrabiany, jednego punktu kalibracyjnego o ustalonych współrzędnych na maszynie. W przypadku frezarki elementem, do którego mocuje się przedmiot obrabiany jest stół, a w przypadku tokarki jest to wrzeciono przedmiotowe. Po wyznaczeniu punktu kalibracyjnego rejestruje się w układzie sterowania maszyny początkową konfigurację wszystkich ruchomych osi liniowych maszyny, następnie wykonuje się skanerem, zamocowanym do korpusu mocującego uchwyt narzędziowy lub w uchwycie narzędziowym, ruchy liniowe względem elementu, do którego mocuje się przedmiot obrabiany i/lub wykonuje się ruchy liniowe tym elementem względem skanera. Następnie rejestruje się w układzie współrzędnych skanera co najmniej trzy trójwymiarowe położenia punktu kalibracyjnego, na podstawie których tworzy się lokalny układ współrzędnych wyrażony w układzie współrzędnych skanera, który odpowiada lokalnemu układowi współrzędnych wyrażonemu w układzie współrzędnych maszynowym lub dowolnym innym układzie współrzędnych zdefiniowanym na maszynie. Po tak wykonanej kalibracji, wykonuje się przemieszczenia dowolnych ruchomych osi maszyny do nowych położzeń i jednocześnie transformuje się lokalny układ współrzędnych do nowych położzeń, po czym wykonuje się częściowe skany przedmiotu obrabianego i na podstawie znajomości położenia lokalnego układu współrzędnych, znajomości wszystkich osi maszyny w układzie skanera oraz znajomości aktualnych konfiguracji osi względem konfiguracji kalibracyjnych, tworzy się łańcuch transformacji z lokalnego układu współrzędnych do układu współrzędnych skanera, następnie trójwymiarowe położenia punktów zeskanowanych powierzchni transformuje się zgodnie z łańcuchem transformacji do układu współrzędnych skanera, gdzie poprzez połączenie poszczególnych skanów częściowych uzyskuje się odtworzenie geometrii przedmiotu obrabianego.

Korzystnie po wykonaniu skanerem, zamocowanym do korpusu mocującego uchwyt narzędziowy lub w uchwycie narzędziowym, ruchów liniowych względem elementu, do którego mocuje się przedmiot obrabiany i/lub wykonaniu ruchów liniowych tym elementem względem skanera, wykonuje się ruchy obrotowe skanerem względem tego elementu i/lub wykonuje się ruchy obrotowe tym elementem względem skanera. Następnie rejestruje się w układzie współrzędnych skanera co najmniej trzy

trójwymiarowe położenia punktu kalibracyjnego dla każdej osi obrotowej, na których podstawie określa się położenie tej osi w układzie skanera.

Korzystnie po odtworzeniu geometrii przedmiotu obrabianego kompletny skan transformuje się w całości z układu skanera do dowolnego zdefiniowanego na maszynie układu współrzędnych.

Stosuje się skaner, który stanowi co najmniej jedna kamera i/lub kamera głębi albo skaner, który zawiera co najmniej jedną kamerę i co najmniej jeden projektor światła strukturalnego np. w technologii LCD ze źródłem światła LED, laserowej, lub w technologii DLP z halogenowym źródłem światła.

Korzystnie skaner mocuje się do korpusu mocującego uchwyt narzędziowy albo w uchwycie narzędziowym.

Korzystnie skaner mocuje się w uchwycie narzędziowym w taki sposób, aby uzyskać co najmniej jedną dodatkową oś obrotu, inną niż oś obrotu uchwytu narzędziowego.

Rozwiązanie według wynalazku umożliwia powiązanie, poprzez odpowiednie procedury kalibracyjne, układu urządzeń optycznych tworzących skaner trójwymiarowy z łańcuchem kinematycznym maszyny CNC i wyznaczanie nowych położeń i orientacji tego skanera wyłącznie na podstawie odczytywanych zmian struktury kinematycznej (przemieszczeń i obrotów korpusów obrabiarki) w celu dokonywania wielokierunkowego trójwymiarowego pomiaru geometrii przedmiotów w przestrzeni roboczej obrabiarki. Nie są znane rozwiązania, w których układ współrzędnych, związany wyłącznie z przestrzenią pomiarową skanera, i w którym jest on kalibrowany, stanowi integralną część łańcucha kinematycznego maszyny CNC, a ruch (liniowy lub/i obrotowy) korpusów maszyny CNC, wykonywany z bardzo dużą dokładnością, traktowany jest jako ruch ustawczy skanera 3D. Rozwiązanie umożliwia transformację współrzędnych wszystkich zeskanowanych punktów do jednego ze zdefiniowanych układów współrzędnych związanych z maszyną CNC (np.: układu maszynowego, układu narzędziowego lub dowolnego lokalnego układu współrzędnych zdefiniowanego na maszynie), a zatem pozwala na automatyczne łączenie skanów nawet bardzo skomplikowanych i odległych od siebie fragmentów powierzchni, nieposiadających punktów wspólnych. Rozwiązanie pozwala na łączenie skanów trójwymiarowych przestrzeni roboczej obrabiarki oraz przedmiotów obrabianych z dużą dokładnością bez wykorzystywania punktów referencyjnych, bazujące jedynie na znanych chwilowych

konfiguracjach kinematycznych korpusów tej obrabiarki oraz znanych skalibrowanych relacjach pomiędzy poszczególnymi położeniami ruchomego skanera a dowolnym zdefiniowanym układem współrzędnych związanym z maszyną CNC. Dzięki zamocowaniu skanera, którego układ odniesienia, związany wyłącznie z przestrzenią pomiarową skanera, i w którym jest on kalibrowany, skalibrowany jest względem układu kinematycznego maszyny CNC, w sąsiedztwie uchwytu narzędziowego lub wrzeciona albo też bezpośrednio w uchwycie narzędziowym lub wrzecionie możliwe jest łączenie poszczególnych skanów i trójwymiarowa rekonstrukcja całej przestrzeni roboczej bez wykorzystywania punktów referencyjnych (markerów) bazując wyłącznie na znanej chwilowej strukturze kinematycznej tej obrabiarki oraz znajomości aktualnego położenia i orientacji skanera w tej strukturze. Rozwiązanie nadaje się do zastosowania do obrabiarek prostych, np. tokarek klasycznych i frezarek trzyosiowych oraz do obrabiarek o bardzo skomplikowanej strukturze kinematycznej z dodatkowym uchylnym wrzecionem i/lub uchylno-obrotowym stołem, a także do frezarko-tokarek. Zaletą rozwiązania jest brak konieczności stosowania punktów referencyjnych każdorazowo mocowanych na skanowanym przedmiocie czy stole obrabiarki, trudnych do obserwacji z dowolnego kierunku oraz wymagających ochrony przed bardzo niekorzystnym otoczeniem (mgła olejowa, wióry). Rozwiązanie według wynalazku znacznie upraszcza proces pomiaru często skomplikowanej geometrii przedmiotu obrabianego, a także minimalizuje czas operacji przygotowawczo-zakończeniowych oraz czas operacji pomocniczych, w tym czas przestoju obrabiarki oraz czas przebywania operatora wewnątrz przestrzeni roboczej.

Rozwiązanie według wynalazku może mieć zastosowanie do planowania bezkolizyjnych ruchów narzędzia, identyfikacji elementów mocujących np. imadeł czy bazowania przedmiotu obrabianego. Kompleksowe automatyczne skanowanie przestrzeni roboczej obrabiarki może być przeprowadzone w sposób inteligentny i bezkolizyjny dla dowolnego ustawienia uchwytów i przedmiotu obrabianego, co umożliwi bardzo elastyczne podejście do procesu wytwarzania, przyspiesza proces przebrojenia maszyny, a odpowiednio przygotowane oprogramowanie obrabiarki samodzielnie dokona przejazdów ustawczych i zaplanuje pomiary w trakcie obróbki.

Rozwiązanie według wynalazku bliżej opisane jest w przykładach wykonania oraz na rysunkach, gdzie fig. 1 przedstawia sposób kalibracji skanera złożonego z jednej

kamery, zamocowanego trwale względem wrzeciona 3-osiowej frezarki, fig. 2 przedstawia sposób skanowania z wykorzystaniem transformacji kinematycznych korpusów tej obrabiarki, fig. 3 przedstawia sposób kalibracji skanera złożonego z dwóch kamer i jednego projektora, zamocowanego we wrzecionie frezarki, fig. 4 przedstawia powiązanie układu współrzędnych skanera mocowanego w uchwycie narzędziowym z dodatkową osią obrotu, prostopadłą względem osi obrotu uchwytu narzędziowego, fig. 5 przedstawia powiązanie układu współrzędnych skanera mocowanego w uchwycie narzędziowym z osią wychylną stołu frezarki, prostopadłą względem osi obrotu uchwytu narzędziowego, fig. 6 przedstawia sposób kalibrowania położenia skanera złożonego z jednej kamer i jednego projektora, zamocowanego bezpośrednio do korpusu mocującego uchwyt narzędziowy tokarki, fig. 7 przedstawia sposób skanowania przedmiotu obrabianego z wykorzystaniem znanych transformacji wrzeciona przedmiotowego oraz korpusu mocującego uchwyt narzędziowy, a fig. 8 przedstawia powiązanie układu współrzędnych skanera złożonego z dwóch kamer i jednego projektora, mocowanego bezpośrednio w uchwycie narzędziowym z dodatkową osią obrotu, inną niż oś obrotu wrzeciona przedmiotowego.

Przykład 1

Skaner 1, jak przedstawiono na fig. 1, stanowi kamera C, której parametry wewnętrzne i zewnętrzne zostały skalibrowane metodą Jean-Yves Bouguet z użyciem płaskiego wzorca kalibracyjnego w układzie współrzędnych S skanera 1, zamocowana do korpusu 4 mocującego uchwyt narzędziowy – wrzeciono 5 trzyosiowej frezarki z kolumną pionową. Korpus 4 wraz zamocowanym skanerem 1 oraz stół 2 ustawia się tak, aby możliwa była obserwacja przez skaner 1 przestrzeni roboczej frezarki. Na stole 2, do którego mocuje się przedmiot obrabiany 3, wyznacza się jeden punkt kalibracyjny m o znanym położeniu względem maszynowego układu współrzędnych M. W układzie sterowania frezarki rejestruje się początkowe konfiguracje korpusów maszyny, to jest położenie z_0 korpusu 4 wraz z zamocowanym skanerem 1 w osi z frezarki oraz położenie x_0, y_0 stołu 2 w osiach x oraz y. Następnie wykonuje się stołem 2 niezależne ruchy w kierunku x oraz y i rejestruje się w układzie współrzędnych S skanera 1 minimum trzy trójwymiarowe położenia punktu m powstałe w wyniku ruchów stołu 2, to jest dwa położenia w dla ruchu w osi x i jedno położenie dla ruchu w osi y. Na ich podstawie tworzy się w układzie współrzędnych S lokalny układ współrzędnych T, który odpowiada

lokalnemu układowi współrzędnych T związanemu ze stołem 2 i przedmiotem obrabianym 3, i wyrażonemu w maszynowym układzie współrzędnych M . Po tak wykonanej kalibracji marker m może zostać zabezpieczony lub usunięty ze stołu 2. Jak pokazano na fig. 2, do stołu 2 frezarki mocuje się przedmiot obrabiany 3. Następnie stół 2 wraz z przedmiotem obrabianym 3 oraz korpus 4 przestawia się względem zarejestrowanej początkowej konfiguracji maszyny do nowych konfiguracji x_1, y_1, z_1 transformując lokalny układ współrzędnych T do nowego położenia. Następnie wykonuje się w układzie współrzędnych S skanera 1 skan częściowy p_1 powierzchni przedmiotu obrabianego 3 z wykorzystaniem metody SfM. Następnie, na podstawie znajomości położenia układu współrzędnych T , znajomości położenia osi x, y, z frezarki w układzie współrzędnych S skanera 1 oraz znajomości aktualnych konfiguracji tych osi względem konfiguracji początkowych tworzy się łańcuch transformacji F_{TS} , to jest uporządkowany szereg translacji z układu współrzędnych T do układu współrzędnych S skanera 1. Następnie uzyskane trójwymiarowe współrzędne punktów zeskanowanej częściowej powierzchni p_1 transformowane są do układu współrzędnych S skanera 1 zgodnie z łańcuchem transformacji F_{TS} . Następnie stół 2 frezarki i korpus 4 zostają przestawione do innego dogodnego położenia tworząc nową konfigurację x_2, y_2, z_2 położenia osi maszyny względem konfiguracji początkowych. Układ współrzędnych T transformuje się do kolejnego położenia, po czym wykonany zostaje nowy skan częściowy p_2 powierzchni przedmiotu obrabianego 3. Tworzony jest analogicznie łańcuch transformacji F_{TS} z układu współrzędnych T do układu współrzędnych S skanera 1, dzięki któremu współrzędne punktów zeskanowanej powierzchni p_2 zostają przetransformowane do układu współrzędnych S . Analogicznie dla każdego kolejnych położenia stołu 2 i korpusu 4 współrzędne punktów kolejnych częściowych skanów transformowane są do układu współrzędnych S skanera 1, a tym samym wszystkie skany są dopasowywane do siebie bez dodatkowych punktów referencyjnych i reprezentują geometrię przedmiotu obrabianego 3. Współrzędne trójwymiarowe punktów dla połączonych skanów wyrażone zostają w układzie współrzędnych T dla początkowej konfiguracji korpusów maszyny, a zatem dzięki kalibracji znane jest ich położenie w maszynowym układzie współrzędnych M .

Przykład 2

Rozwiązanie jak w przykładzie 1, przy czym skaner 1 stanowi tak zwana kamera głębi ToF (ang. Time of Flight) umożliwiająca odczyt matrycowy czasu przelotu wiązki światła wypromieniowanego ze zintegrowanego promiennika światła podczerwonego. Kamera ToF pozwala na zarejestrowanie trójwymiarowej chmury punktów z jednego ujęcia z pominięciem algorytmów wykorzystywanych w przypadku klasycznej kamery jak w przykładzie 1.

Przykład 3

Rozwiązanie jak w przykładzie 1, przy czym skaner 1 stanowią dwie kamery C, których parametry zewnętrzne są kalibrowane w tym samym układzie współrzędnych S skanera 1. Układ wielokamerowy upraszcza i przyspiesza proces rekonstrukcji trójwymiarowej przedmiotu obrabianego na podstawie obrazów redukując konieczną liczbę zmian konfiguracji maszyny.

Przykład 4

Rozwiązanie jak w przykładzie 1, przy czym skaner 1 stanowi jedna kamera C i jeden projektor światła strukturalnego P w technologii LCD ze źródłem światła LED, o parametrach wewnętrznych i zewnętrznych skalibrowanych względem układu współrzędnych S skanera 1. Projektor P umożliwia jednoznaczne określenie punktów charakterystycznych na skanowanym fragmencie p powierzchni przedmiotu obrabianego z wykorzystaniem znanych technik kodowania światłem strukturalnym w postaci kodów Graya i sinusoidalnych prążków przesuwanych w fazie. Kolejno punkty charakterystyczne, zidentyfikowane na obrazie z kamery C umożliwiają zastosowanie technik triangulacyjnych w celu rekonstrukcji ich położenia w układzie współrzędnych S skanera 1.

Przykład 5

Rozwiązanie jak w przykładzie 4, przy czym skaner 1 stanowią dwie kamery C i jeden projektor P światła strukturalnego w technologii laserowej wyświetlający wzorzec – regularną siatkę. Skaner taki umożliwia trójwymiarową rekonstrukcję położenia większej powierzchni w krótszym czasie dla mniejszej liczby zmian konfiguracji maszyny.

Przykład 6

Rozwiązanie jak w przykładzie 1, przy czym skaner 1 stanowią dwie kamery C i jeden projektor światła strukturalnego P w technologii DLP z halogenowym źródłem światła, a

skaner 1 zamocowany jest, jak pokazano na fig. 3, bezpośrednio we wrzecionie 5 frezarki, zamocowanym do korpusu 4. Powoduje to uzyskanie dodatkowej pionowej osi obrotowej dla skanera 1, co zwiększa możliwości i zakres obserwacji przestrzeni roboczej frezarki przez skaner 1. W tym przypadku do konfiguracji początkowej korpusów dodaje się wartość początkową kąta α_0 obrotu w osi wrzeciona 5. Następnie podczas kalibracji, po wykonaniu niezależnych ruchów stołem 2 w kierunku x oraz y, wykonuje się dodatkowy obrót w osi wrzeciona 5 i rejestruje się w układzie S skanera 1 minimum trzy dodatkowe trójwymiarowe położenia punktu kalibracyjnego m, definiujące w układzie S położenie i kierunek osi obrotu wrzeciona 5. Po ustawieniu stołu 2 i korpusu 4 do nowych pozycji oraz po obróceniu wrzeciona 5 o dowolny, znany kąt α względem kąta początkowego α_0 skanuje się fragment powierzchni przedmiotu obrabianego 3. W łańcuchu transformacji otrzymanych współrzędnych punktów zeskanowanej powierzchni uwzględnia się kąt α obrotu wrzeciona 5.

Przykład 7

Rozwiązanie jak w przykładzie 6, przy czym, jak pokazano na fig. 4, skaner 1 zamocowany jest bezpośrednio we wrzecionie 5 frezarki w taki sposób, aby uzyskać dodatkową oś obrotu, prostopadłą do osi obrotu wrzeciona 5. Realizuje się to przez zamocowanie dodatkowych, ruchomych elementów montażowych 6 między skanerem 1, a wrzecionem 5. Dodatkowa oś obrotu kalibrowana jest w sposób analogiczny do kalibracji osi wrzeciona 5 opisanej w przykładzie 6. To rozwiązanie pozwala na zwiększenie możliwości i zakresu obserwacji przestrzeni roboczej frezarki przez skaner 1. Przed kalibracją do konfiguracji początkowej korpusów dodaje się wartość początkową kąta β_0 dodatkowej osi obrotu. Po obróceniu dodatkowej osi o dowolny kąt β względem kąta początkowego β_0 następuje skanowanie fragmentu powierzchni przedmiotu obrabianego. W łańcuchu transformacji otrzymanych współrzędnych punktów zeskanowanej powierzchni uwzględnia się kąt β rotacji dodatkowej osi.

Przykład 8

Rozwiązanie jak w przykładzie 7, przy czym, jak pokazano na fig. 5, konstrukcja frezarki umożliwia uchylenie stołu 2 o kąt δ . Zastosowanie uchylnego stołu 2 zwiększa możliwości pomiaru elementów o skomplikowanej geometrii przez skaner 1. Przed kalibracją do konfiguracji początkowej korpusów dodaje się wartość początkową kąta δ_0 osi uchyłu stołu 2. Oś obrotu stołu 2 kalibrowana jest w sposób analogiczny do kalibracji

dotkowej osi obrotu skanera 1 opisanej w przykładzie 7. Następnie po obróceniu dodatkowej osi stołu 2 o dowolny kąt δ względem kąta początkowego δ_0 następuje skanowanie fragmentu powierzchni przedmiotu obrabianego. W łańcuchu transformacji otrzymanych współrzędnych punktów zeskanowanej powierzchni uwzględnia się kąt δ rotacji dodatkowej osi.

Przykład 9

Skaner 1 stanowi jedna kamera C i jeden projektor P światła strukturalnego, w technologii DLP i źródłem światła LED, których parametry wewnętrzne i zewnętrzne zostały skalibrowane z użyciem płaskiego wzorca kalibracyjnego metodą Jean-Yves Bouguet w układzie współrzędnych S. Skaner 1 zamocowany jest, jak pokazano na fig. 6, bezpośrednio do korpusu 4 mocującego uchwyt narzędziowy 5, który przemieszcza się wzdłuż osi z oraz x tokarki. Sposób zamocowania skanera 1 umożliwia kontrolowane przemieszczanie skanera 1 wzdłuż głównych osi posuwu tokarki, co zwiększa zakres obserwacji przestrzeni roboczej skanerem 1. Korpus 4 z zamocowanym skanerem 1 ustawia się tak, aby możliwa była obserwacja przez skaner 1 przestrzeni roboczej tokarki oraz wrzeciona przedmiotowego 2. Na wrzecionie przedmiotowym 2 wyznacza się jeden punkt kalibracyjny m o znanym położeniu względem maszynowego układu współrzędnych M. W układzie sterowania tokarki rejestruje się początkowe konfiguracje maszyny, to jest ustawienie kątowe ϕ_0 w osi obrotu wrzeciona przedmiotowego 2 oraz położenie z_0, x_0 korpusu 4 wraz zamocowanym skanerem 1 w osiach z oraz x. Następnie korpusem 4 wykonuje się niezależne ruchy w kierunku z oraz x tokarki i rejestruje się w układzie współrzędnych S skanera 1 minimum trzy trójwymiarowe położenia punktu m powstałe w wyniku ruchów korpusu 4, to jest dwa położenia dla ruchu w osi z i jedno położenie dla ruchu w osi x. Następnie w układzie współrzędnych S skanera 1 rejestruje się minimum trzy punkty m, powstałe w wyniku obrotu wrzeciona przedmiotowego 2 dookoła jego osi z. Na podstawie zarejestrowanych ruchów punktu m tworzy się w układzie współrzędnych S skanera 1 lokalny układ współrzędnych T, związany z wrzecionem przedmiotowym 2 tokarki, który odpowiada lokalnemu układowi współrzędnych T wyrażonemu w maszynowym układzie współrzędnych M. Po tak wykonanej kalibracji marker m może zostać zabezpieczony lub usunięty z wrzeciona przedmiotowego 2. We wrzecionie przedmiotowym 2 mocowany jest przedmiot obrabiany 3. Jak pokazano na fig. 7, korpus 4 tokarki oraz wrzeciono przedmiotowe 2

przestawia się względem zarejestrowanej początkowej konfiguracji maszyny do nowych konfiguracji x_1, z_1, ϕ_1 transformując lokalny układ współrzędnych T do nowego położenia. Następnie wykonuje się w układzie współrzędnych S skanera 1 trójwymiarowy skan częściowy p1 powierzchni przedmiotu obrabianego 3 z wykorzystaniem algorytmów dekodowania światła strukturalnego, parametrów kalibracyjnych kamery C i projektora P, i metod triangulacyjnych. Następnie, na podstawie znajomości położenia układu T, znajomości położenia osi x, z, ϕ tokarki w układzie współrzędnych S skanera 1 oraz znajomości aktualnych konfiguracji tych osi względem konfiguracji początkowych tworzy się łańcuch transformacji F_{TS} , to jest uporządkowany szereg translacji i rotacji z układu współrzędnych T do układu współrzędnych S. Następnie uzyskane trójwymiarowe współrzędne punktów zeskanowanej powierzchni p1 transformowane są do układu S skanera 1 zgodnie z łańcuchem transformacji F_{TS} . Korpus 4 tokarki i wrzeciono przedmiotowe 2 zostają przestawione do innego dogodnego położenia tworząc nową konfigurację x_2, z_2, ϕ_2 tokarki względem konfiguracji początkowych, a układ współrzędnych T transformuje się do kolejnego położenia, po czym wykonany zostaje nowy skan częściowy p2 powierzchni przedmiotu obrabianego 3. Tworzony jest analogicznie łańcuch transformacji F_{TS} z układu współrzędnych T do układu współrzędnych S, dzięki któremu współrzędne punktów zeskanowanej powierzchni p2 zostają przetransformowane do układu współrzędnych S. Analogicznie dla każdego kolejnych położenia wrzeciona przedmiotowego 2 i korpusu 4 współrzędne punktów kolejnych częściowych skanów transformowane są do układu współrzędnych S, a tym samym wszystkie skany są dopasowywane do siebie bez dodatkowych punktów referencyjnych i reprezentują geometrię przedmiotu obrabianego 3. Współrzędne trójwymiarowe punktów dla połączonych skanów wyrażone zostają w układzie T dla początkowej konfiguracji korpusów maszyny, a zatem dzięki kalibracji znane jest ich położenie w maszynowym układzie współrzędnych M.

Przykład 10

Rozwiązanie jak w przykładzie 9, przy czym, jak pokazano na fig. 8, skaner 1 stanowią dwie kamery C i jeden projektor P światła strukturalnego których parametry wewnętrzne i zewnętrzne zostały skalibrowane z użyciem płaskiego wzorca kalibracyjnego metodą Jean-Yves Bouguet w układzie współrzędnych S. Skaner 1 zamocowany jest w uchwycie

narzędziowym 5 tokarki, zamocowanym do korpusu 4, w taki sposób, aby uzyskać dodatkową oś obrotową dla skanera 1, co zwiększa możliwości i zakres obserwacji przestrzeni roboczej tokarki przez skaner 1. Realizuje się to przez zamocowanie dodatkowych ruchomych elementów montażowych 6 między skanerem 1, a uchwytem narzędziowym 5. W tym przypadku do konfiguracji początkowej korpusów dodaje się wartość początkową kąta ω_0 obrotu w dodatkowej osi obrotu. Następnie podczas kalibracji, po wykonaniu niezależnych ruchów korpusem 4 w kierunku z oraz x, wykonuje się dodatkowy obrót dodatkowej osi i rejestruje się w układzie współrzędnych S skanera 1 minimum trzy dodatkowe trójwymiarowe położenia punktu kalibracyjnego m, definiujące w układzie współrzędnych S położenie i kierunek dodatkowej osi obrotu. W łańcuchu transformacji otrzymanych punktów zeskanowanej powierzchni uwzględnia się kąt ω obrotu dodatkowej osi.

Przykład 11

Rozwiązanie jak w przykładzie 9, przy czym skaner 1 stanowi tak zwana kamera głębi ToF (ang. Time of Flight) umożliwiająca odczyt matrycowy czasu przelotu wiązki światła wypromieniowanego ze zintegrowanego promiennika światła podczerwonego. Kamera ToF pozwala na zarejestrowanie trójwymiarowej chmury punktów z jednego ujęcia z pominięciem algorytmów wykorzystywanych w przypadku klasycznej kamery jak w przykładzie 8.

Przykład 12

Rozwiązanie jak w przykładzie 9, przy czym skaner 1 stanowią dwie kamery C, których parametry zewnętrzne są kalibrowane w tym samym układzie współrzędnych S skanera 1. Układ wielokamerowy upraszcza i przyspiesza proces rekonstrukcji trójwymiarowej przedmiotu obrabianego na podstawie obrazów redukując konieczną liczbę zmian konfiguracji maszyny.

Przykład 13

Rozwiązanie jak w przykładzie 9, przy czym skaner 1 stanowi jedna kamera C i jeden projektor światła strukturalnego P w technologii LCD i źródłem światła LED, o parametrach wewnętrznych i zewnętrznych skalibrowanych względem układu współrzędnych S skanera 1. Projektor P umożliwia jednoznaczne określenie punktów charakterystycznych na skanowanym fragmencie p powierzchni przedmiotu obrabianego z wykorzystaniem znanych technik kodowania światłem strukturalnym w postaci kodów

Graya i sinusoidalnych prążków przesuwanych w fazie. Kolejno punkty charakterystyczne, zidentyfikowane na obrazie z kamery C umożliwiają zastosowanie technik triangulacyjnych w celu rekonstrukcji ich położenia w układzie współrzędnych S skanera 1.

Przykład 14

Rozwiązanie jak w przykładzie 9, przy czym skaner 1 stanowią dwie kamery C i jeden projektor P światła strukturalnego w technologii laserowej wyświetlający wzorzec – przesuwne równoległe prążki. Skaner taki umożliwia trójwymiarową rekonstrukcję położenia większej powierzchni w krótszym czasie dla mniejszej liczby zmian konfiguracji maszyny.