

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **239594**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **428377**

(22) Data zgłoszenia: **27.12.2018**

(51) Int.Cl.

G01C 11/00 (2006.01)

G01B 11/03 (2006.01)

G01B 11/25 (2006.01)

(54)

Urządzenie do pomiarów przemieszczeń

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

29.06.2020 BUP 14/20

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

20.12.2021 WUP 38/21

(73) Uprawniony z patentu:

**UNIWERSYTET PRZYRODNICZY
WE WROCŁAWIU, Wrocław, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**PIOTR GOŁUCH, Wrocław, PL
JANUSZ KUCHMISTER, Wrocław, PL
KAZIMIERZ ĆMIELEWSKI, Wrocław, PL**

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Anna Kasperowicz

PL 239594 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest urządzenie do pomiarów przemieszczeń względnych, takich jak: translacja i rotacja, zwłaszcza na obiektach naturalnych (przyrody nieożywionej np. bloki skalne) i inżynierskich (np. budynki, budowle itp.).

W przypadku pomiarów szczelin dylatacyjnych, pęknięć w konstrukcji budowli i budynków oraz przesunięć struktur tektonicznych w strefach uskokowych wykorzystuje się względne metody pomiaru, wraz ze specjalistycznym oprzyrządowaniem. Obserwacje przemieszczeń wykonywane są z zastosowaniem: metod geodezyjnych i fotogrametrycznych, umożliwiające odniesienie ich wyników do stałych układów odniesienia, jak również przyrządów mechanicznych oraz czujników, wykorzystujących w pomiarach zjawiska fizyczne, takie jak: indukcyjność, pojemność czy rezystancja, które umożliwiają odniesienie otrzymanych wyników pomiarów do niestałych układów odniesienia.

Współczesny nadzór geodezyjny, na etapach powstawania, diagnozowania i prognozowania występujących na badanych obiektach deformacji, odkształceń i przemieszczeń, korzysta z najnowszych osiągnięć z zakresu mechaniki precyzyjnej i optoelektroniki. Przyczyniło się to do budowy nowoczesnych urządzeń pomiarowych, które pozwalają na wykonanie zautomatyzowanych i telemetrycznych obserwacji w czasie rzeczywistym.

Zasady pomiarów przemieszczeń względnych i bezwzględnych opisane są w licznej literaturze fachowej [Lazzarini T: Geodezyjne pomiary przemieszczeń budowli i ich otoczenia, PPWK, Warszawa 1977; Bryś H. i Przewłocki S.: Geodezyjne metody pomiarów przemieszczeń budowli, PWN, Warszawa 1998] oraz w obowiązujących normach krajowych [PN-N-02211: Geodezja – Geodezyjne wyznaczanie przemieszczeń – Terminologia podstawowa, PKN, 2000] i międzynarodowych [Engineer Manual EM 1110-2-1009: Structural Deformation Surveying, U.S. Army Corps of Engineers, Washington 2018].

W opisie patentu PL 207417 podano urządzenie, przeznaczone do pomiaru wartości przemieszczenia względnego przedmiotów, które wyposażone jest w źródło światła i liniową matrycę światłowodową, z której sygnały świetlne przesyłane są światłowodami do układu pomiarowego, zawierającego fotodetektor połączony ze wzmacniaczem. Pomiedzy źródłem światła a liniową matrycą światłowodową, której światłowody połączone są z układem pomiarowym, jest umieszczona przesuwnie ruchoma przysłona, przy czym wzdłuż przysłony są umieszczone na przemian paski przezroczyste i nieprzezroczyste.

Ponadto znany jest z opisu patentu PL 217348 system pomiarów zmian długości między znakami pomiarowymi, dotyczący pomiarów względnych zmian długości odcinków, w wyniku których wyznacza się odkształcenia gruntu lub obiektu między znakami pomiarowymi, wyznaczającymi dany odcinek. Cechą charakterystyczną tego wynalazku jest to, że do znaku pomiarowego, wyznaczającego jeden z końców mierzonego odcinka, zamocowane jest trwale ciągnie, które przewieszone jest przez krążek zamontowany na płycie pomiarowej, założonej na drugi znak pomiarowy, wyznaczający drugi koniec odcinka. Na płycie pomiarowej zamontowana jest kamera oraz podziałka liniowa, a do ciągnia zamocowany jest wskaźnik odczytowy, przy czym koniec ciągnia wyposażony jest w obciążnik. Obraz wskaźnika odczytowego na tle podziałki liniowej rejestrowany jest kamerą i przesyłany przewodami zasilająco-sygnałowymi do rejestratora.

Znane są przyrządy mechaniczne [katalog GOECKE: Der Ausrüster für die Vermessungstechnik GK 7, s. 59, www.goecke.de], wyposażone w podziałki, służące do monitorowania pęknięć w konstrukcji budowli w dwóch lub w trzech kierunkach (Riss-Spion 101-RS1, Riss-Spion 101-RS2, Riss-Spion 101-RS3 i Rissmonitor 101-TT4). W zależności od prognozowanych przemieszczeń przyrządy te montuje się na badanym obiekcie w różnych konfiguracjach. Z użyciem tych przyrządów można monitorować występujące względne przemieszczenia występujące na badanych obiektach. Przyrządy te składają się z dwóch wzajemnie przesuwających się płytek, na których naniesione są, z odpowiednią dokładnością, podziałki liniowe. Płytki te mogą być wykonane z materiału przezroczystego lub nieprzezroczystego.

Znany jest z literatury szczelinomierz TM-71 [Kostak B., 1991: "Combined indicator using moiré technique", Balkema, Rotterdam, ISBN 9054100257, 53–61]. Urządzenie składa się z dwóch indykatorów zorientowanych w dwóch prostopadłych płaszczyznach **xy** oraz **xz**. Każdy indykator składa się z pary szklanych płytek, z wytrawionymi siatkami spiralnymi, z hiperbolicznym prążkowaniem (tarcza kołowa), oraz liniowymi, z równoległym prążkowaniem, które wyznaczają dwie prostokątne powierzchnie interferencyjne. Ramiona szczelinomierza TM-71, przymocowane do bloków skalnych na skrzydłach uskoku, przenoszą ich ruchy względne, które następnie rejestrowane są przez siatki główne oraz liniowe szczelinomierza. Obserwowane prążki Moiré'a na siatkach spiralnych powstają w wyniku superpozycji regularnych struktur geometrycznych (spirale), wytrawionych na szklanych płytkach, z chwilą zmiany

położenia jednej płytki względem drugiej. Zmiana położenia płytek związana jest z przemieszczeniem względnym bloków skorupowych. Natomiast prążki Moire'a na siatkach liniowych powstają na skutek różnicy gęstości światła przy przejściu przez obrócone względem siebie siatki liniowe w wyniku rotacji bloków skorupowych.

Znana jest metoda opracowania obrazów, pozyskanych za pomocą kamer metrycznych i niemetrycznych. Opisana w publikacji J. Butowtta i R. Kaczyńskiego metoda przetwarzania zdjęć o dowolnym kącie nachylenia względem przyjętej płaszczyzny odniesienia [Butowtt J. i Kaczyński R.: „Fotogrametria”, WAT, Warszawa 2003, str. 23÷39], realizowana jest na podstawie znanych i stosowanych w fotogrametrii zasad geometrii rzutowej. Metoda płaskich przekształceń rzutowych bazuje na przekształceniu płaszczyzny w płaszczyznę, z wykorzystaniem co najmniej czterech odpowiadających sobie punktów homologicznych, przy założeniu, że żadne trzy punkty, spośród tych czterech, nie leżą na jednej prostej. Ta metoda przetwarzania pozwala wyeliminować zniekształcenia perspektywiczne, wynikające z nierównoległości wzajemnej płaszczyzn podlegających opracowaniu. W publikacji tej (na str. 126÷130) opisane są również znane i stosowane w fotogrametrii procedury kalibracji kamer.

Problemem wskazanego stanu techniki jest to, że przyrządy mechaniczne nie pozwalają zautomatyzować sposobu prowadzonych obserwacji oraz nie pozwalają przesłać wyników tych obserwacji do jednostki rejestrującej. Innym ograniczeniem, dostrzeżonym w opisach stosowanych urządzeń, są niewielkie zakresy pomiarowe oraz konieczność ciągłej dostępności do punktów pomiarowych, w miejscach prowadzonych obserwacji. W znanych urządzeniach wykorzystane może być także zjawisko interferencji oraz analiza prążków Moire'a, które w prawdzie umożliwiają uzyskanie wysokiej dokładności pomiarów, ale ograniczone są do niewielkiej przestrzeni obserwacji.

Dlatego okazało się, że wprowadzenie do zestawu pomiarowego metody fotogrametrycznej, pozwala na automatyczną rejestrację i transmisję wyników pomiarów oraz zdalny pomiar na pozyskanych obrazach, natomiast zastosowanie pionu laserowego, umożliwia odniesienie wyników pomiarów do linii pionu. Pion laserowy pozwala wyznaczyć kąty pochylenia mierzonego obiektu w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach.

Zastosowany pion laserowy posiada podstawę, do której przytwierdzony jest wspornik pionu. Wspornik pionu ma zawieszony swobodnie, nadajnik laserowy. Emitowana przez nadajnik laserowy wiązka laserowa pada na przezroczysty ekran. Przebieg linii pionu wyznacza się metodą fotogrametryczną, na podstawie pomiaru położenia plamki laserowej na ekranie.

Celem wynalazku jest opracowanie urządzenia pomiarowego do pomiarów przemieszczeń, które umożliwią, na drodze przetworzenia fotogrametrycznego zarejestrowanych obrazów tarczy pomiarowej na tle ramy odniesienia, w sposób automatyczny i telemetryczny, określenie zmian położenia, tj. przesunięć i obrotów elementów pomiarowych jednego względem innego na obiekcie, w odniesieniu do linii pionu. Opracowany wynalazek może być stosowany jako pojedynczy zestaw lub zwielokrotniony na elementach obiektu.

Istotą wynalazku jest to, że urządzenie zawiera ramę odniesienia, z naniesionymi co najmniej czterema sygnałami odniesienia, które są osadzone w jednej płaszczyźnie x_r, z_r , w lokalnym kartezjańskim układzie współrzędnych x, y, z_r , przy czym, jeśli liczba sygnałów odniesienia wynosi m , to liczba sygnałów odniesienia, które nie mogą leżeć na jednej prostej, wynosi $m-1$, oraz zawiera tarczę pomiarową, z co najmniej czterema sygnałami kontrolowanymi, które są osadzone w jednej płaszczyźnie x_t, z_t , w lokalnym kartezjańskim układzie współrzędnych x_t, y_t, z_t , przy czym, jeśli liczba sygnałów kontrolowanych wynosi k , to liczba sygnałów kontrolowanych, które nie mogą leżeć na jednej prostej, wynosi $k-1$. Kamera elektroniczna ma zdefiniowany kartezjański układ współrzędnych x_k, y_k, z_k i połączona jest z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych oraz zwrócona jest obiektywem w stronę ramy odniesienia i tarczy pomiarowej. Ponadto do ramy odniesienia przytwierdzony jest pion laserowy, który ma w dolnej części kamerę elektroniczną pionu, połączoną z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych (CRPD) oraz wspornik pionu, który w środku górnej, części ma z użyciem zawiesia, zawieszony swobodnie nadajnik laserowy, emitujący wzdłuż linii siły ciężkości wiązkę laserową, która na ekranie, znajdującym się w znanej odległości d od zawiesia, ma postać plamki laserowej, sygnalizowanej przez punkt kontrolny P , przy czym pion laserowy ma zdefiniowany kartezjański układ współrzędnych x_p, y_p, z_p .

Korzystnie jest, gdy system centralnej rejestracji i przetwarzania danych jest przenośnym mikrokomputerem.

Korzystnie również jest, gdy sygnały odniesienia mają postać kwadratów, zwłaszcza koloru białego i/lub czarnego.

Korzystnie także jest, gdy sygnały odniesienia mają postać albo koncentrycznych okręgów, albo koła, albo krzyża, albo znaku kodowego.

Korzystnie również jest, gdy sygnały odniesienia są rozmieszczone na ramie odniesienia w sposób regularny.

Korzystnie także jest, gdy sygnały kontrolowane mają postać kwadratów, zwłaszcza koloru białego i/lub czarnego.

Korzystnie także jest, gdy sygnały kontrolowane mają postać albo koncentrycznych okręgów, albo koła, albo krzyża, albo znaku kodowego.

Korzystnie również jest, gdy sygnały kontrolowane są rozmieszczone na ramie odniesienia w sposób regularny.

Korzystnie jest, gdy urządzenie zawiera wysięgnik.

Korzystnie również jest, gdy kamera elektroniczna połączona jest z wysięgnikiem w sposób rozłączny, za pomocą śruby sprzęgającej.

Korzystnie także jest, gdy kamera elektroniczna połączona jest z wysięgnikiem na stałe.

Korzystnie również jest, gdy wysięgnik przymocowany jest za pomocą śrub mocujących do elementu odniesienia niezależnie od ramy odniesienia.

Korzystnie także jest, gdy wysięgnik przymocowany jest na stałe do ramy odniesienia.

Korzystnie również jest, gdy wysięgnik ma postać płaskownika w kształcie litery L.

Korzystnie także jest, gdy kamera elektroniczna ustawiona jest na stanowisku obserwacyjnym niezwiązanym z mierzonym obiektem.

Korzystnie także jest, gdy tarcza pomiarowa znajduje się wewnątrz ramy odniesienia.

Korzystnie również jest, gdy odpowiednie osie kartezjańskich układów współrzędnych: tarczy pomiarowej $\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$ i ramy odniesienia $\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$ w pomiarze wyjściowym są względem siebie w przybliżeniu równoległe.

Korzystnie również jest, gdy kamera elektroniczna połączona jest bezprzewodowo z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych.

Korzystnie także jest, gdy oś $\mathbf{y}_k$ kartezjańskiego układu współrzędnych kamery elektronicznej jest w przybliżeniu prostopadła do płaszczyzny $\mathbf{x}_r\mathbf{z}_r$ wyznaczonej przez kartezjański układ współrzędnych ramy odniesienia.

Korzystnie również jest, gdy odpowiednie osie kartezjańskich układów współrzędnych: kamery elektronicznej $\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$ i ramy odniesienia $\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$ w pomiarze wyjściowym są względem siebie w przybliżeniu równoległe.

Korzystnie także jest, gdy oś $\mathbf{y}_k$ kartezjańskiego układu współrzędnych kamery elektronicznej jest zwrócona w przybliżeniu centralnie do ramy odniesienia.

Korzystnie także jest, gdy rama odniesienia ma postać ramy prostokątnej albo obręczy.

Korzystnie również jest, gdy tarcza pomiarowa ma postać prostokąta albo koła.

Korzystnie także jest, gdy pion laserowy połączony jest z ramą odniesienia w sposób rozłączny, za pomocą śrub sprzęgających.

Korzystnie również jest, gdy pion laserowy połączony jest z ramą odniesienia na stałe.

Korzystnie także jest, gdy, po połączeniu pionu laserowego z ramą odniesienia, kartezjańskie układy współrzędnych ramy odniesienia $\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$ i pionu laserowego $\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$ są względem siebie równoległe.

Zastosowany pion laserowy jest elementem pomiarowym, w którym linia pionu pokrywa się z siłą ciężkości, przebiegającą wzdłuż wiązki laserowej emitowanej przez nadajnik laserowy. Wychylenie kątowne wiązki laserowej, przy znanej odległości od zawiesia do ekranu $\mathbf{d}$, od linii pionu, wyznacza się na podstawie pomiaru położenia plamki lasera na ekranie, metodą fotogrametryczną, z użyciem kamery elektronicznej.

Zależność pomiędzy kartezjańskim i układami współrzędnych: ramy odniesienia **3** ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$) względem kamery elektronicznej **6** ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) wyznacza się na podstawie wzoru 1, wykorzystując w CRPD **7** odpowiednie oprogramowanie. Formuła ta jest matematycznym zapisem przestrzennej transformacji między dwoma kartezjańskimi układami współrzędnych.

$$\overrightarrow{X}_k = M_r^k \cdot \overrightarrow{X}_r + \overrightarrow{T}_r^k \quad (1)$$

gdzie:

- M_r^k jest to macierz obrotu, opisująca zależność kątową między układem współrzędnych ramy odniesienia (x_r, y_r, z_r) a układem współrzędnych kamery elektronicznej (x_k, y_k, z_k) ;
- $\vec{T}_r^k$ to wektor translacji, określający przesunięcie początku układu współrzędnych ramy odniesienia (x_r, y_r, z_r) od początku układu współrzędnych kamery elektronicznej (x_k, y_k, z_k) ;
- $\vec{X}_r$ to wektor określający położenie danego punktu w układzie współrzędnych ramy odniesienia (x_r, y_r, z_r) ;
- $\vec{X}_k$ to wektor określający położenie danego punktu w układzie współrzędnych kamery elektronicznej (x_k, y_k, z_k) .

Macierz obrotu M_r^k to macierz kwadratowa, która w euklidesowej przestrzeni 3D ma wymiar 3x3 elementy (wzór 2). Dziewięć współczynników macierzy obrotu M_r^k są to liczby rzeczywiste, które stanowią związki funkcji trygonometrycznych (sinusów i cosinusów) trzech kątów obrotów (tzw. kątów Euler'a, oznaczonych greckimi literami): omega (ω), phi (φ) i kappa (κ), przy czym, w pierwszej kolejności stosuje się obrót układu ramy odniesienia **3** (x_r, y_r, z_r) o kąt omega (ω) wokół osi x_r (oś pierwszego obrotu), następnie o kąt phi (φ) wokół osi y_r (oś drugiego obrotu) i ostatecznie o kąt kappa (κ) wokół osi z_r (oś trzeciego obrotu). Jest to tzw. konwencja ω - φ - κ . Kąty ω , φ , κ określają rotację układu współrzędnych ramy odniesienia **3** (x_r, y_r, z_r) względem układu współrzędnych kamery **6** (x_k, y_k, z_k) .

$$M_r^k = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos \varphi \cos \kappa \\ m_{12} &= \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ m_{13} &= \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ m_{21} &= -\cos \varphi \sin \kappa \\ m_{22} &= \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ m_{23} &= \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ m_{31} &= \sin \varphi \\ m_{32} &= -\sin \omega \cos \varphi \\ m_{33} &= \cos \omega \cos \varphi \end{aligned}$$

W zagadnieniu odwrotnym do przedstawionego powyżej, w tzw. konwencji κ - φ - ω , określa się zależność kątową, pomiędzy układem współrzędnych kartezjańskich kamery elektronicznej **6** (x_k, y_k, z_k) względem układu współrzędnych ramy odniesienia **3** (x_r, y_r, z_r) . Zależność tą opisuje, przy założeniu ortogonalności macierzy obrotu M_r^k , wzór 3, z którego wynika, że odwrotność macierzy ortogonalnej jest równa jej transpozycji. Stąd macierz R_k^r , określająca kątową zależność między układem współrzędnych kamery elektronicznej **6** (x_k, y_k, z_k) a układem współrzędnych ramy odniesienia **3** (x_r, y_r, z_r) , przedstawia wzór 4.

$$M^{-1} = (M_r^k)^{-1} = (M_r^k)^T = R_k^r = R \quad (3)$$

$$R_k^r = (M_r^k)^T = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{21} & m_{31} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

W celu określenia wektora translacji $\vec{T}_k^r$, który określa przesunięcie początku układu współrzędnych kamery elektronicznej **6** (x_k, y_k, z_k) od początku układu współrzędnych ramy odniesienia **3** (x_r, y_r, z_r) , na podstawie znanej macierzy obrotu R_k^r i wektora translacji $\vec{T}_r^k$, korzysta się z wzoru 5.

$$\vec{T}_k^r = -R_k^r \cdot \vec{T}_r^k \quad (5)$$

Matematyczny zapis odwrotnej transformacji, czyli transformacji między kartezjańskim układem współrzędnych kamery elektronicznej **6** ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) a kartezjańskim układem współrzędnych ramy odniesienia **3** ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$), przedstawia wzór 6.

$$\vec{X}_r = R_k^r \cdot \vec{X}_k + \vec{T}_k^r \quad (6)$$

Na podstawie macierzy M_k^r (lub R_k^r) (wzory 2 i 4) można wyznaczyć kąty obrotów ω_r , φ_r , κ_r (wzór 7). Wynik obliczeń uzyskujemy w radianach, natomiast w celu przeliczenia na stopnie należy przemnożyć wynik przez przelicznik $180^\circ/\pi$.

$$\begin{aligned} \omega_r &= -\text{atan2}(m_{32}, m_{33}) \\ \varphi_r &= \text{asin}(m_{31}) \\ \kappa_r &= -\text{atan2}(m_{21}, m_{11}) \end{aligned} \quad (7)$$

Następnie, w analogiczny sposób do przedstawionego powyżej, określa się zależność między kartezjańskim i układami współrzędnych tarczy pomiarowej **4** ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$) i kamery elektronicznej **6** ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$), czyli wyznacza się macierz obrotu R_k^t (określającą zależność kątową między układem współrzędnych kamery elektronicznej **6** ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) a układem współrzędnych tarczy pomiarowej **4** ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$)) i wektor translacji $\vec{T}_k^t$ (określający przesunięcie początku układu współrzędnych kamery elektronicznej **6** ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) od początku układu współrzędnych tarczy pomiarowej **4** ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$)).

Na podstawie zarejestrowanych w czasach t_0 (czas pomiaru wyjściowego) i t_1 (czas pomiaru aktualnego) obrazów położenia sygnałów odniesienia **11** i sygnałów kontrolowanych **12**, wykorzystując oprogramowanie, wyznacza się przesunięcia (${}^0\vec{T}_t$ i ${}^1\vec{T}_t$) oraz rotacje (${}^0R_t^r$ i ${}^1R_t^r$) między kartezjańskim i układami współrzędnych: tarczy pomiarowej **4** ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$) względem ramy odniesienia **3** ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$), w jednorodnym kartezjańskim układzie współrzędnych kamery elektronicznej **6** ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) (fig. 4 i fig. 5).

Na podstawie obliczonych wartości odpowiednich wektorów translacji i odpowiednich macierzy obrotów wyznacza się wzajemne położenie elementu pomiarowego **1**, reprezentowanego przez tarczę pomiarową **4**, względem elementu odniesienia **2**, reprezentowanego przez ramę odniesienia **3**.

W zależności od prognozowanych wielkości przemieszczeń elementów **1** i **2** mierzonego obiektu i wymaganych dokładności pomiarów należy dobrać wielkość urządzenia (w tym ilość i wielkość sygnałów kontrolowanych **12** i sygnałów odniesienia **11**) oraz sposób ustawienia kamery elektronicznej **6** i jej parametry techniczne. Należy również pamiętać, że na wyniki pomiarów, wraz ze wzrostem odległości fotografowania, mogą mieć większy wpływ warunki środowiskowe (np. gradient temperatury i wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne, nasłonecznienie, zapylenie czy występujące wibracje), powodując obniżenie dokładności realizowanych pomiarów. Wpływ wymienionych czynników środowiskowych można ograniczyć monitorując dodatkowymi sensorami parametry środowiskowe i atmosfery. Wówczas wyniki z tych sensorów należy uwzględnić, stosując odpowiednie procedury obliczeniowe w CRPD **7**, podczas przetwarzania obrazów, zarejestrowanych kamerą elektroniczną **6**.

Przedmiot wynalazku przedstawiony jest w przykładzie wykonania na rysunku, na którym: fig. 1 – przedstawia urządzenie do pomiarów przemieszczeń w rzucie aksonometrycznym, przy braku połączenia ramy odniesienia z wysięgnikiem, fig. 2 – przedstawia urządzenie w rzucie aksonometrycznym, przy połączeniu ramy odniesienia z wysięgnikiem, fig. 3 – przedstawia urządzenie w rzucie aksonometrycznym bez wysięgnika, przy ustawieniu kamery elektronicznej na niezależnym stanowisku obserwacyjnym, którym może być statyw lub słup obserwacyjny, fig. 4 – przedstawia zależność między kartezjańskimi układami współrzędnych: kamery elektronicznej $\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$, ramy odniesienia $\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$, pionu laserowego $\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$ i tarczy pomiarowej $\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$ w pozycji wyjściowej pomiarowej t_0 , fig. 5 – przedstawia zależność między kartezjańskimi układami współrzędnych: kamery elektronicznej $\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$, ramy odniesienia $\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$, pionu laserowego $\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$ i tarczy pomiarowej $\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$ w pozycji aktualnej pomiarowej t_1 , natomiast fig. 6 – przedstawia zależność między kartezjańskimi układami współrzędnych: kamery elektronicznej $\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$, ramy odniesienia $\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$, pionu laserowego $\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$ i tarczy pomiarowej $\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$ w kolejnej pozycji pomiarowej w czasie t_2 , przy pochyleniu: ramy odniesienia, pionu laserowego i kamery elektronicznej oraz tarczy pomiarowej.

P r z y k ł a d 1. Urządzenie do pomiarów przemieszczeń, jak na fig. 1, składa się z tarczy pomiarowej **4**, przytwierdzonej śrubami mocującymi **10** do elementu pomiarowego **1** mierzonego

obiektu, oraz z ramy odniesienia **3**, przytwierdzonej śrubami mocującymi **10** do elementu odniesienia **2** obiektu mierzonego. Do ramy odniesienia **3** przytwierdzony jest śrubami sprzęgającymi **9** pion laserowy **14**, posiadający kamerę elektroniczną pionu **15**, połączoną przewodem transmisyjnym kamery elektronicznej pionu **16** z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych (CRPD) **7**, i wspornik pionu **17**. W środku górnej części wspornika pionu **17**, z użyciem zawiesia **18**, zawieszony jest swobodnie nadajnik laserowy **19**, emitujący wzdłuż linii siły ciężkości wiązkę laserową **20**, o odległości od zawiesia do ekranu **d**. W dolnej części wspornika pionu **17** usytuowana jest kamera elektroniczna pionu **15**, nad której obiektywem znajduje się ekran **21**, na powierzchnię którego pada wiązka laserowa **20**, która ma postać plamki laserowej a którą sygnalizuje punkt kontrolny **P**. Punkt kontrolny **P** obserwowany jest przez kamerę elektroniczną pionu **15**. Rama odniesienia **3** posiada sygnały odniesienia **11** i ma zdefiniowany kartezjański układ współrzędnych ramy odniesienia x_r, y_r, z_r . Tarcza pomiarowa **4** posiada sygnały kontrolowane **12** i ma zdefiniowany kartezjański układ współrzędnych tarczy pomiarowej x_t, y_t, z_t . Natomiast pion laserowy **14** ma zdefiniowany kartezjański układ współrzędnych pionu laserowego x_p, y_p, z_p . Do elementu odniesienia **2** przymocowany jest wysięgnik **5**, do którego przymocowana jest kamera elektroniczna **6** śrubą sprzęgającą **9**. Kamera elektroniczna **6**, która ma określony swój kartezjański układ współrzędnych x_k, y_k, z_k , połączona jest przewodem transmisyjnym **8** z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych (CRPD) **7**.

Urządzenie do pomiarów przemieszczeń, wykonane jak w przykładzie 1, przeznaczone jest do określenia prognozowanych przemieszczeń elementów **1** i **2** mierzonego obiektu w zakresie od 0.0 mm do 50.0 mm, z dokładnością pomiarów na poziomie dziesiątych i setnych części milimetra. Rotację elementów mierzonego obiektu wyznacza się na poziomie tysięcznych części stopnia. Wykonane pomiary przemieszczeń odniesione są do linii pionu, realizowanej przez oś z_p kartezjańskiego układu współrzędnych pionu laserowego x_p, y_p, z_p .

Wielkość urządzenia (w tym ilość i wielkość sygnałów kontrolowanych **12** i sygnałów odniesienia **11**), jak i sposób ustawienia kamery elektronicznej **6** i jej parametry techniczne dobierane są po przeprowadzonej wnikliwej analizie zaistniałego przypadku. Parametry techniczne kamery elektronicznej **6**, w tym wielkość i rozdzielczość matrycy oraz zastosowany obiektyw, powinny być tak dobrane, aby uwzględniały wymiary ramy odniesienia **3** oraz wymiary zastosowanych sygnałów kontrolowanych **12** i sygnałów odniesienia **11**.

Natomiast w przypadku kamery elektronicznej pionu **15** należy dobrać i rozdzielczość matrycy oraz zastosowany obiektyw tak aby w sposób optymalny obserwować i rejestrować położenie plamki laserowej: reprezentowanej przez punkt **P**. Rejestrację obrazów kamerą elektroniczną **6** należy prowadzić przy ustalonych warunkach oświetleniowych.

Sposób pomiaru przemieszczeń:

Przed przystąpieniem do pomiaru przemieszczeń na mierzonym obiekcie montuje się, za pomocą śrub mocujących **10**, odpowiednio na elemencie pomiarowym **1** tarczę pomiarową **4**. Z kolei na elemencie odniesienia **2** montuje się ramę odniesienia **3**, z pionem laserowym **14**. Kamerę elektroniczną **6** mocuje się na wysięgniku **5**, przy czym wysięgnik **5** jest połączony z elementem odniesienia **2** (fig. 1). Kamerę elektroniczną **6** łączy się przewodem transmisyjnym **8** z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych (CRPD) **7**, natomiast tarczę pomiarową **4** umieszcza się tak, aby znalazła się wewnątrz ramy odniesienia **3** oraz, aby płaszczyzny x_y kartezjańskich układów współrzędnych: x_r, y_r, z_r i x_t, y_t, z_t były względem siebie równoległe. Po połączeniu pionu laserowego **14** z ramą odniesienia **3**, kartezjańskie układy współrzędnych: ramy odniesienia x_r, y_r, z_r i pionu laserowego x_p, y_p, z_p , również są względem siebie równoległe. Tak przygotowany obiekt i urządzenie pomiarowe nadaje się do realizacji obserwacji cyklicznych, w założonym interwale czasowym, i pozwala określić zachodzące przemieszczenia na mierzonym obiekcie. Wyznaczone przemieszczenia odnoszą się do wzajemnych przemieszczeń elementów: pomiarowego **1** i odniesienia **2**.

Przed rozpoczęciem właściwych pomiarów urządzenie według wynalazku kalibruje się. W przypadku ramy odniesienia **3** określa się położenie sygnałów odniesienia **11** w kartezjańskim układzie współrzędnych x_r, y_r, z_r ramy odniesienia **3**. Dla tarczy pomiarowej **4** wyznacza się położenie sygnałów kontrolowanych **12** w kartezjańskim układzie współrzędnych x_t, y_t, z_t tarczy pomiarowej **4**, a w przypadku pionu laserowego **14** określa się kierunki i wartości wychyleń kątowych linii pionu reprezentowanej przez wiązkę laserową **20**, o znanej odległości od zawiesia do ekranu **d**, na podstawie pomiaru położenia plamki laserowej (punktu kontrolnego **P**), metodą fotogrametryczną, z użyciem kamery elektronicznej pionu **15**, w kartezjańskim układzie współrzędnych pionu laserowego x_p, y_p, z_p .

Dla kamery elektronicznej **6** i kamery elektronicznej pionu **15** wyznacza się elementy orientacji wewnętrznej wraz z parametrami dystorsji układu optycznego, stosując znane fotogrametryczne procedury. Dla pionu laserowego **14** określa się położenie zerowe układu współrzędnych pionu laserowego $x_p y_p z_p$, w którym pochylenie kątowe osi z_p wynosi 0° . Tarczę pomiarową **4** i ramę odniesienia **3** sytuuje się w dobranym zakresie głębi ostrości kamery elektronicznej **6**, przy zadanej odległości fotografowania.

Podczas pomiaru wyjściowego w czasie t_0 (fig. 4), a następnie pomiaru aktualnego w czasie t_1 (fig. 5), rejestruje się kamerą elektroniczną **6** obrazy: ramy odniesienia **3** z sygnałami odniesienia **11** i tarczy pomiarowej **4** z sygnałami kontrolowanymi **12**, oraz kamerą elektroniczną pionu **15** obrazy położenia plamki laserowej (punktu kontrolnego **P**), (fig. 1).

W przypadku wystąpienia niedostatecznego natężenia oświetlenia, podczas fotografowania ramy odniesienia **3** i tarczy pomiarowej **4**, wprowadza się w danym okresie pomiarowym t_0 lub t_1 dodatkowe oświetlenie wspomnianych elementów urządzenia.

Zarejestrowane kamerą elektroniczną **6** obrazy przesyła się do systemu CRPD **7**, gdzie następuje ich przetwarzanie i archiwizacja.

Przykładowy pomiar realizuje się przy następujących założeniach:

- kamera elektroniczna **6**, wyposażona jest w obiektyw o stałej kamery 50.00 mm;
- rama odniesienia **3** jest prostokątna i ma wymiary 300 mm na 200 mm;
- tarcza pomiarowa **4** jest również prostokątna i ma wymiary 120 mm na 140 mm;
- odległość kamery elektronicznej **6** od ramy odniesienia **3** (y_k) wynosi 200.00 mm;
- podczas pomiaru wyjściowego (w czasie t_0) odpowiednie osie kartezjańskich układów współrzędnych tarczy pomiarowej ($x_t y_t z_t$) i ramy odniesienia ($x_r y_r z_r$) są względem siebie równoległe, czyli macierz obrotu ${}^0R_r^t$ (macierz opisująca zależność kątową między układem współrzędnych tarczy pomiarowej ($x_t y_t z_t$) a układem współrzędnych ramy odniesienia ($x_r y_r z_r$)) jest macierzą jednostkową;
- oś y_k kartezjańskiego układu współrzędnych kamery elektronicznej **6** jest zwrócona w przybliżeniu prostopadle i centralnie do ramy odniesienia **4** – wartości kątów $\omega_k, \varphi_k, \kappa_k$ (określające rotację układu współrzędnych kamery elektronicznej $x_k y_k z_k$ w kartezjańskim układzie współrzędnych ramy odniesienia ($x_r y_r z_r$)) oblicza się na etapie pomiaru wyjściowego (w czasie t_0) i pomiaru aktualnego (w czasie t_1).

Na podstawie zarejestrowanych w czasie t_0 obrazów sygnałów odniesienia **11** i sygnałów kontrolowanych **12** oblicza się wartości (fig. 4): wektorów translacji: ${}^0\vec{T}_r^k$ (wektor przesunięcia początku układu współrzędnych ramy odniesienia ($x_r y_r z_r$) od początku układu współrzędnych kamery elektronicznej ($x_k y_k z_k$)), ${}^0\vec{T}_r^k = [-145.00; -200.00; -95.00]$ i ${}^0\vec{T}_k^t$ (wektor określający przesunięcie początku układu współrzędnych kamery elektronicznej ($x_k y_k z_k$) od początku układu współrzędnych tarczy pomiarowej ($x_t y_t z_t$)) (${}^0\vec{T}_k^t = [118.07; -219.13; 62.03]$).

Oblicza się również macierze obrotów: ${}^0R_k^r$ (macierz opisująca zależność kątową między układem współrzędnych kamery elektronicznej ($x_k y_k z_k$) a układem współrzędnych ramy odniesienia ($x_r y_r z_r$)) i ${}^0R_k^t$ (macierz opisująca zależność kątową między układem współrzędnych kamery elektronicznej ($x_k y_k z_k$) a układem współrzędnych tarczy pomiarowej ($x_t y_t z_t$)).

$${}^0R_k^r = \begin{bmatrix} 0.9999 & -0.0120 & 0.0073 \\ 0.0120 & 0.9999 & -0.0095 \\ -0.0072 & 0.0096 & 0.9999 \end{bmatrix}$$

$${}^0R_k^t = \begin{bmatrix} 0.9999 & -0.0120 & 0.0073 \\ 0.0120 & 0.9999 & -0.0095 \\ -0.0072 & 0.0096 & 0.9999 \end{bmatrix}$$

Na podstawie macierzy ${}^0R_k^r$ wyznacza się (wzór 7) wartości kątów: $\omega_k, \varphi_k, \kappa_k$, określające rotację układu współrzędnych kamery elektronicznej $x_k y_k z_k$ względem układu współrzędnych ramy odniesienia ($x_r y_r z_r$) ($\omega_k = 0.544^\circ, \varphi_k = 0.421^\circ, \kappa_k = 0.685^\circ$). Ponieważ obie macierze obrotów ${}^0R_k^r$ i ${}^0R_k^t$ są sobie równe, więc kąty obrotów: ω, φ, κ (określające rotację układu współrzędnych tarczy pomiarowej $x_t y_t z_t$

w układzie współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$) wynoszą $\alpha = 0.000^\circ$, $\varphi = 0.000^\circ$, $\kappa_1 = 0.000^\circ$. Świadczy to, że odpowiednie osie układów współrzędnych $\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$ i $\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$ są wzajemnie równoległe.

Stosując wzór nr 5 oblicza się wektor ${}^0\overline{\mathbf{T}}_k^r$ (przesunięcie początku układu kamery elektronicznej ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) od początku układu ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$)):

$${}^0\overline{\mathbf{T}}_k^r = - {}^0\mathbf{R}_k^r * {}^0\overline{\mathbf{T}}_r^k = [148.07; -199.13; 92.03].$$

Na podstawie wyników obliczeń można wyznaczyć składowe wektora ${}^0\overline{\mathbf{T}}_t^r$ (określające przesunięcie początku układu współrzędnych tarczy pomiarowej ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$) od początku układu współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$)):

$${}^0\overline{\mathbf{T}}_t^r = [30.00; 20.00; 30.00].$$

Otrzymane wyniki obliczeń potwierdziły przyjęte założenia odnośnie położenia ramy odniesienia **3**, tarczy pomiarowej **4**, kamery elektronicznej **6** i pionu laserowego **14** w czasie t_0 .

W określonym cyklu pomiarowym (w czasie pomiaru aktualnego t_1) na zarejestrowanych obrazach podobnie oblicza się (fig. 5) wartości wektorów ${}^1\overline{\mathbf{T}}_k^r$ (${}^1\overline{\mathbf{T}}_k^r$ [148.07; -199.13; 92.03]) i ${}^1\overline{\mathbf{T}}_t^r$ (${}^1\overline{\mathbf{T}}_t^r$ = [113.52; -222.36; 60.95]) oraz macierze obrotów: ${}^1\mathbf{R}_k^r$ i ${}^1\mathbf{R}_t^r$, na podstawie których wyznacza się przesunięcie tarczy pomiarowej **4** względem ramy odniesienia **3** (${}^1\overline{\mathbf{T}}_t^r$ = [31.12; 21.98; 33.06], oraz macierz obrotu ${}^1\mathbf{R}_t^r$ (macierz opisująca zależność kątową między układem współrzędnych tarczy pomiarowej ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$) a układem współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$)).

$${}^1\mathbf{R}_t^r = \begin{bmatrix} 0.9999 & -0.0131 & 0.0087 \\ 0.0131 & 0.9999 & -0.0044 \\ -0.0087 & 0.0045 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Na podstawie macierzy ${}^1\mathbf{R}_t^r$ wyznacza się (wzór 7) kąty obrotu α , φ , κ_1 (określające rotację w czasie t_1 układu współrzędnych tarczy pomiarowej $\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$ w układzie współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$): $\alpha = 0.250^\circ$, $\varphi = 0.500^\circ$, $\kappa_1 = 0.750^\circ$). Obliczone wartości składowych wektora ${}^1\overline{\mathbf{T}}_t^r$ i kąty obrotu α , φ , κ_1 w czasie t_1 są zgodne z założonymi wartościami, przyjętymi w tym przykładzie obliczeniowym.

W następnym kroku określa się wychylenie mierzonego obiektu względem linii pionu, realizowanej przez oś $\mathbf{z}_p$, kartezjańskiego układu współrzędnych $\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$ pionu laserowego **14**. W tym celu analizuje się wyniki pomiarów fotogrametrycznych, określających położenia plamki laserowej (punktu kontrolnego **P**) na obrazach zarejestrowanych kamerą elektroniczną pionu **15**. Jeżeli wyniki pomiarów wychyleń pionu laserowego **14** są w czasie pomiaru aktualnego t_1 takie same jak w czasie pomiaru wyjściowego t_0 , na poziomie dokładności pomiarów tego urządzenia, wówczas macierz ${}^1\mathbf{R}_p^{p_0}$ jest macierzą jednostkową i pion laserowy **14** wykazuje stałość położenia ramy odniesienia **3** (jednocześnie elementu odniesienia **2**), w czasie pomiaru aktualnego t_1 (fig. 5). W tym przypadku, wyznaczone przemieszczenie względne tarczy pomiarowej **4** względem ramy odniesienia **3** odnoszą się do linii pionu, zrealizowanej przez pion laserowy **14** (fig. 5).

P r z y k ł a d 2. Urządzenie do pomiarów przemieszczeń, jak na fig. 2, składa się z tarczy pomiarowej **4**, przytwierdzonej śrubami mocującymi **10** do elementu pomiarowego **1** mierzonego obiektu, oraz ramy odniesienia **3**, przytwierdzonej śrubami mocującymi **10** do elementu odniesienia **2** obiektu mierzonego. Z kolei do ramy odniesienia **3** przytwierdzony jest śrubami sprzęgającymi **9** pion laserowy **14** i przymocowany jest na stałe wysięgnik **5**. Tarcza pomiarowa **4** posiada sygnały kontrolowane **12** i ma zdefiniowany kartezjański układ współrzędnych tarczy pomiarowej $\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$. Natomiast rama odniesienia **3** posiada sygnały odniesienia **11** i ma określony kartezjański układ współrzędnych ramy odniesienia $\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$, a pion laserowy **14** ma zdefiniowany kartezjański układ współrzędnych pionu laserowego $\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$. Dodatkowo do wysięgnika **5** przymocowana jest kamera elektroniczna **6** śrubą sprzęgającą **9**. Kamera elektroniczna **6** ma zdefiniowany swój kartezjański układ współrzędnych $\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$ i połączona jest przewodem transmisyjnym **8** z system centralnej rejestracji i przetwarzania danych (CRPD) **7**.

Urządzenie do pomiaru przemieszczeń, wykonane jak w przykładzie 2, przeznaczone jest do pomiarów prognozowanych przemieszczeń elementów **1** i **2** mierzonego obiektu w zakresie od 0.00 mm

do 10.00 mm z dokładnością pomiarów na poziomie ± 0.01 mm. Rotację elementów mierzonego obiektu wyznacza się na poziomie tysięcznych części stopnia. Wykonane pomiary przemieszczeń odniesione są do kartezjańskiego układu współrzędnych pionu laserowego $x_p y_p z_p$.

W tym przykładzie wykonania wpływ warunków środowiskowych jest ograniczony do minimum. Wielkość urządzenia (w tym ilość i wielkość sygnałów kontrolowanych **12** i sygnałów odniesienia **11**, jak i sposób ustawienia kamery elektronicznej **6** i jej parametry techniczne, dobierane są po przeprowadzonej wnikliwej analizie zaistniałego przypadku. Parametry techniczne kamery elektronicznej **6**, w tym wielkość i rozdzielczość matrycy oraz zastosowany obiektyw, powinny być tak dobrane, aby uwzględniły wymiary ramy odniesienia **3** oraz wymiary zastosowanych sygnałów kontrolowanych **12**, sygnałów odniesienia **11**. Rejestrację obrazów kamerą elektroniczną **6** należy prowadzić przy ustalonych warunkach oświetleniowych.

Natomiast w przypadku kamery elektronicznej pionu **15** należy dobrać i rozdzielczość matrycy oraz zastosowany obiektyw tak aby w sposób optymalny obserwować i rejestrować położenie plamki laserowej reprezentowanej przez punkt **P**. Rejestrację obrazów kamerą elektroniczną **6** należy prowadzić przy ustalonych warunkach oświetleniowych.

Pomiaru dokonuje się jak w przykładzie 1, przy czym wysięgnik **5** przymocowany jest na stałe do ramy odniesienia **3** (fig. 2). Dalej postępuje się jak w przykładzie 1.

P r z y k ł a d 3. Układ jak w przykładzie 1, z tym, że pokazane na fig. 3, gdzie kamera elektroniczna **6** umieszczona jest na niezależnym stanowisku obserwacyjnym **13**, niezwiązanym z mierzonym obiektem.

Urządzenie do pomiaru przemieszczeń, wykonane jak w przykładzie 3, przeznaczone jest do pomiarów prognozowanych przemieszczeń elementów **1** i **2** mierzonego obiektu w zakresie od 0 mm do 200 mm z dokładnością pomiarów w zakresie od setnych części milimetra do kilku milimetrów. Uzyskana dokładność uwarunkowana jest parametrami technicznymi sprzętu pomiarowego i odległością fotografowania. W tym przykładzie wykonania, przy znacznych odległościach fotografowania, należy bezwzględnie uwzględnić wpływ warunków środowiskowych na wyniki pomiarów stosując odpowiednie procedury obliczeniowe w CRPD **7**.

Sposób pomiaru przemieszczeń:

Pomiaru dokonuje się jak w przykładzie 1, czyli względne przemieszczenie tarczy pomiarowej **4** w odniesieniu do ramy odniesienia **3** w czasie t_2 jest takie same jak w czasie t_1 (${}^2R_t^r = {}^1R_t^r$), z tym, że kamera elektroniczna **6** umieszczona jest na stanowisku obserwacyjnym **13**, niezwiązanym z mierzonym obiektem (fig. 3) oraz element odniesienia **2** jak i stanowisko obserwacyjne **13** doznały przemieszczeń w stosunku do elementu pomiarowego **1**.

Podczas pomiaru wyjściowego w czasie t_0 (fig. 4), a następnie pomiaru aktualnego w czasie t_2 (fig. 6), rejestruje się kamerą elektroniczną **6** obrazy: ramy odniesienia **3** (z sygnałami odniesienia **11**) i tarczy pomiarowej **4** (z sygnałami kontrolowanymi **12**) oraz kamerą elektroniczną pionu **15** obrazy położenia plamki laserowej (punktu kontrolnego **P**) (fig. 3). Jeżeli element odniesienia **2**, reprezentowany przez ramę odniesienia **3**, doznał przemieszczenia, wówczas występują istotne różnice w wynikach pomiarów fotogrametrycznych na obrazach zarejestrowanych kamerą elektroniczną pionu **15**, przekraczające założone wartości dopuszczalne (fig. 6, czas kolejnego pomiaru t_2).

W przykładzie obliczeniowym przyjęto, że na podstawie wyników pomiarów fotogrametrycznych na obrazach zarejestrowanych kamerą elektroniczną pionu **15** obliczone kąty obrotu pionu laserowego **14** wynoszą odpowiednio: $\omega_p = -0.2565^\circ$, $\varphi_p = -0.4967^\circ$ i przy założeniu, że po kalibracji osie współrzędnych $x_p y_p$ pionu laserowego **14** są równoległe z osiami współrzędnych $x_r y_r$ ramy odniesienia **3**, wówczas kąt $\kappa_p = 0.000^\circ$. Wtedy macierz obrotu ${}^2R_t^{p_0}$, określająca położenie pionu laserowego **14** w czasie t_2 , oraz macierz ${}^2R_r^{p_0}$, określająca położenie ramy odniesienia **3** względem linii pionu, są sobie równe i wynoszą:

$${}^2R_r^{p_0} = {}^2R_p^{p_0} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & -0.0087 \\ 0.0000 & 1.0000 & 0.0045 \\ 0.0087 & -0.0045 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Na podstawie znanych w literaturze wzorów przeprowadza się obliczenia położenia tarczy pomiarowej **4** względem linii pionu, a macierz obrotu ${}^2R_t^{p_0}$ ma wartość:

$${}^2R_t^{p_0} = \begin{bmatrix} 0.9999 & -0.0131 & 0.0001 \\ 0.0131 & 0.9999 & 0.0001 \\ -0.0001 & -0.0001 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Kąty obrotu tarczy pomiarowej **4** względem linii pionu, otrzymane z macierzy ${}^2R_t^{p_0}$ (wzór 7), przyjmują odpowiednio wartości: $\omega_k = -0.0065^\circ$, $\varphi_k = 0.0033^\circ$ i $\kappa_k = 0.7522^\circ$. Kąty obrotu ramy odniesienia **3** względem linii pionu, otrzymane z macierzy ${}^2R_r^{p_0}$ (wzór 7), przyjmują wartości: $\omega_r = -0.2565^\circ$, $\varphi_r = -0.4967^\circ$ i $\kappa_r = 0.0000^\circ$. Wektor przesunięcia tarczy pomiarowej **4** w stosunku do ramy odniesienia **3** (${}^p\vec{T}_t$), wyznaczony w kartezjańskim układzie współrzędnych $x_p y_p z_p$ pionu laserowego **14**, czyli odniesiony do linii pionu, wynosi:

$${}^p\vec{T}_t = [30.83; 22.13; 33.23]$$

Otrzymane wyniki obliczeń potwierdziły przyjęte założenia odnośnie położenia ramy odniesienia **3**, tarczy pomiarowej **4**, kamery elektronicznej **6** i pionu laserowego **14** w czasie t_2 . Cały tok obliczeń przeprowadza się w systemie CRPD 7, stosując odpowiednie algorytmy.

Wykaz oznaczeń:

1	– element pomiarowy
2	– element odniesienia
3	– rama odniesienia
4	– tarcza pomiarowa
5	– wysięgnik
6	– kamera elektroniczna
7	– system centralnej rejestracji i przetwarzania danych (CRPD)
8	– przewód transmisyjny kamery
9	– śruba sprzęgająca
10	– śruba mocująca
11	– sygnał odniesienia
12	– sygnał kontrolowany
13	– stanowisko obserwacyjne
14	– pion laserowy
15	– kamera elektroniczna pionu
16	– przewód transmisyjny kamery pionu
17	– wspornik pionu
18	– zawiesie
19	– nadajnik laserowy
20	– wiązka laserowa
21	– ekran
P	– punkt kontrolny
d	– odległość od zawiesia do ekranu
t₀	– czas pomiaru wyjściowego
t₁	– czas pomiaru aktualnego, przy stałości elementu odniesienia
t₂	– czas kolejnego pomiaru aktualnego, przy pochyleniu elementu odniesienia
x_ry_rz_r	– kartezjański układ współrzędnych ramy odniesienia
x_ty_tz_t	– kartezjański układ współrzędnych tarczy pomiarowej
x_ky_kz_k	– kartezjański układ współrzędnych kamery elektronicznej
x_py_pz_p	– kartezjański układ współrzędnych pionu laserowego
$\omega_k, \varphi_k, \kappa_k$	– trzy kąty Euler'a, określające rotację układu współrzędnych ramy odniesienia x_ry_rz_r
$\omega_t, \varphi_t, \kappa_t$	– trzy kąty Euler'a, określające rotację układu współrzędnych tarczy pomiarowej x_ty_tz_t

$\omega_p, \varphi_p, \kappa_p$	– trzy kąty Euler'a, określające rotację układu współrzędnych pionu laserowego $\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$
$\omega_k, \varphi_k, \kappa_k$	– trzy kąty Euler'a, określające rotację układu współrzędnych kamery elektronicznej $\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$
${}^0R_t^r, {}^1R_t^r, {}^2R_t^r$	– macierze obrotu, opisujące zależność kątową między układem współrzędnych tarczy pomiarowej ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$) a układem współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$), odpowiednio podczas pomiaru: wyjściowego w czasie t_0 , aktualnego w czasie t_1 , aktualnego w czasie t_2
${}^0\overrightarrow{T}_t^r, {}^1\overrightarrow{T}_t^r, {}^2\overrightarrow{T}_t^r$	– wektory translacji, określające przesunięcie początku układu współrzędnych tarczy pomiarowej ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$) od początku układu współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$), odpowiednio podczas pomiaru: wyjściowego w czasie t_0 , aktualnego w czasie t_1 , aktualnego w czasie t_2
${}^0R_k^t, {}^1R_k^t, {}^2R_k^t$	– macierze obrotu, opisujące zależność kątową między układem współrzędnych kamery elektronicznej ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) a układem współrzędnych tarczy pomiarowej ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$), odpowiednio podczas pomiaru: wyjściowego w czasie t_0 , aktualnego w czasie t_1 , aktualnego w czasie t_2
${}^0\overrightarrow{T}_k^t, {}^1\overrightarrow{T}_k^t, {}^2\overrightarrow{T}_k^t$	– wektory translacji, określające przesunięcie początku układu współrzędnych kamery elektronicznej ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) od początku układu współrzędnych tarczy pomiarowej ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$), odpowiednio podczas pomiaru: wyjściowego w czasie t_0 , aktualnego w czasie t_1 , aktualnego w czasie t_2
${}^0R_k^r, {}^1R_k^r, {}^2R_k^r$	– macierze obrotu, opisujące zależność kątową między układem współrzędnych kamery elektronicznej ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) a układem współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$), odpowiednio podczas pomiaru: wyjściowego w czasie t_0 , aktualnego w czasie t_1 , aktualnego w czasie t_2
${}^0\overrightarrow{T}_k^r, {}^1\overrightarrow{T}_k^r, {}^2\overrightarrow{T}_k^r$	– wektory translacji, określające przesunięcie początku układu współrzędnych kamery elektronicznej ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) od początku układu współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$), odpowiednio podczas pomiaru: wyjściowego w czasie t_0 , aktualnego w czasie t_1 , aktualnego w czasie t_2
${}^0R_p^p, {}^1R_p^p, {}^2R_p^p$	– macierze obrotu, opisujące zależność kątową między układem współrzędnych kamery elektronicznej ($\mathbf{x}_k\mathbf{y}_k\mathbf{z}_k$) a układem współrzędnych pionu laserowego ($\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$), odpowiednio podczas pomiaru: wyjściowego w czasie t_0 , aktualnego w czasie t_1 , aktualnego w czasie t_2
${}^0R_r^p, {}^1R_r^p, {}^2R_r^p$	– macierze obrotu, opisujące zależność kątową między układem współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$) a układem współrzędnych pionu laserowego ($\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$), odpowiednio podczas pomiaru: wyjściowego w czasie t_0 , aktualnego w czasie t_1 , aktualnego w czasie t_2
${}^0R_p^{p_0}, {}^1R_p^{p_0}, {}^2R_p^{p_0}$	– macierz obrotu, opisująca zależność kątową układu współrzędnych pionu laserowego ($\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$) względem linii pionu, odpowiednio podczas pomiaru: wyjściowego w czasie t_0 , aktualnego w czasie t_1 , aktualnego w czasie t_2
${}^2R_t^{p_0}$	– macierz obrotu, określająca zależność kątową układu współrzędnych tarczy pomiarowej ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$) względem linii pionu
${}^2R_r^{p_0}$	– macierz obrotu, określająca zależność kątową układu współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$) względem linii pionu
${}^p\overrightarrow{T}_t^r$	– wektor translacji, określający przesunięcie początku układu współrzędnych tarczy pomiarowej ($\mathbf{x}_t\mathbf{y}_t\mathbf{z}_t$) w stosunku do początku układu współrzędnych ramy odniesienia ($\mathbf{x}_r\mathbf{y}_r\mathbf{z}_r$), wyznaczony w kartezjańskim układzie współrzędnych pionu laserowego $\mathbf{x}_p\mathbf{y}_p\mathbf{z}_p$, czyli odniesiony do linii pionu

Zastrzeżenia patentowe

1. Urządzenie do pomiarów przemieszczeń, zawierające kamerę elektroniczną, połączoną z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych (CRPD) i pion oraz fotopunkty rejestrowane na obrazach, **znamienne tym**, że zawiera ramę odniesienia (3), z naniesionymi co najmniej czterema sygnałami odniesienia (11), które są osadzone w jednej płaszczyźnie $x_r z_r$, w lokalnym kartezjańskim układzie współrzędnych $x_r y_r z_r$, przy czym, jeśli liczba sygnałów odniesienia (11) wynosi m , to liczba sygnałów odniesienia (11), które nie mogą leżeć na jednej prostej, wynosi $m-1$, oraz zawiera tarczę pomiarową (4), z co najmniej czterema sygnałami kontrolowanymi (12), które są osadzone w jednej płaszczyźnie $x_t z_t$, w lokalnym kartezjańskim układzie współrzędnych $x_t y_t z_t$, przy czym, jeśli liczba sygnałów kontrolowanych (12) wynosi k , to liczba sygnałów kontrolowanych (12), które nie mogą leżeć na jednej prostej, wynosi $k-1$, ponadto kamera elektroniczna (6) ma zdefiniowany kartezjański układ współrzędnych $x_k y_k z_k$ i połączona jest z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych (7) oraz zwrócona jest obiektywem w stronę ramy odniesienia (3) i tarczy pomiarowej (4), ponadto do ramy odniesienia (3) przytwierdzony jest pion laserowy (14), który ma w dolnej części kamerę elektroniczną pionu (15), połączoną z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych (CRPD) (7) oraz wspornik pionu (17), który w środku górnej, części ma z użyciem zawiesia (18), zawieszony swobodnie nadajnik laserowy (19), emitujący wzdłuż linii siły ciężkości wiązkę laserową (20), która na ekranie (21), znajdującym się w znanej odległości d od zawiesia (18), ma postać plamki laserowej, sygnalizowanej przez punkt kontrolny P , przy czym pion laserowy (14) ma zdefiniowany kartezjański układ współrzędnych $x_p y_p z_p$.
2. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że system centralnej rejestracji i przetwarzania danych (7) jest przenośnym mikrokomputerem.
3. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały odniesienia (11) mają postać kwadratów.
4. Urządzenie według zastrz. 3, **znamienne tym**, że kwadraty mają wypełnienie kolorem białym i/lub czarnym.
5. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały odniesienia (11) mają postać koncentrycznych okręgów.
6. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały odniesienia (11) mają postać koła.
7. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały odniesienia (11) mają postać krzyża.
8. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały odniesienia (11) mają postać znaku kodowego.
9. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały odniesienia (11) są rozmieszczone na ramie odniesienia (3) w sposób regularny.
10. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały kontrolowane (12) mają postać kwadratów.
11. Urządzenie według zastrz. 10, **znamienne tym**, że kwadraty mają wypełnienie kolorem białym i/lub czarnym.
12. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały kontrolowane (12) mają postać koncentrycznych okręgów.
13. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały kontrolowane (12) mają postać koła.
14. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały kontrolowane (12) mają postać krzyża.
15. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały kontrolowane (12) mają postać znaku kodowego.
16. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że sygnały kontrolowane (12) są rozmieszczone na tarczy pomiarowej (4) w sposób regularny.
17. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że urządzenie zawiera wysięgnik (5).
18. Urządzenie według zastrz. 17, **znamienne tym**, że kamera elektroniczna (6) połączona jest z wysięgnikiem (5) w sposób rozłączny, za pomocą śruby sprzęgającej (9).
19. Urządzenie według zastrz. 17, **znamienne tym**, że kamera elektroniczna (6) połączona jest z wysięgnikiem (5) na stałe.

20. Urządzenie według zastrz. 17, **znamienne tym**, że wysięgnik (5) przymocowany jest za pomocą śrub mocujących (10) do elementu odniesienia (2) niezależnie od ramy odniesienia (3).
21. Urządzenie według zastrz. 17, **znamienne tym**, że wysięgnik (5) przymocowany jest na stałe do ramy odniesienia (3).
22. Urządzenie według zastrz. 17, **znamienne tym**, że wysięgnik (5) ma postać płaskownika w kształcie litery L.
23. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że kamera elektroniczna (6) ustawiona jest na stanowisku obserwacyjnym (13) niezwiązanym z mierzonym obiektem.
24. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że tarcza pomiarowa (4) znajduje się wewnątrz ramy odniesienia (3).
25. Urządzenie według zastrz. 24, **znamienne tym**, że odpowiednie osie kartezjańskich układów współrzędnych: tarczy pomiarowej x_t, y_t, z_t i ramy odniesienia x_r, y_r, z_r w pomiarze wyjściowym są względem siebie w przybliżeniu równoległe.
26. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że kamera elektroniczna (6) połączona jest bezprzewodowo z systemem centralnej rejestracji i przetwarzania danych (7).
27. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że oś y_k kartezjańskiego układu współrzędnych kamery elektronicznej (6) jest w przybliżeniu prostopadła do płaszczyzny x_r, z_r wyznaczonej przez kartezjański układ współrzędnych ramy odniesienia (3).
28. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że odpowiednie osie kartezjańskich układów współrzędnych: kamery elektronicznej x_k, y_k, z_k i ramy odniesienia x_r, y_r, z_r w pomiarze wyjściowym są względem siebie w przybliżeniu równoległe.
29. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że oś y_k kartezjańskiego układu współrzędnych kamery elektronicznej (6) jest zwrócona w przybliżeniu centralnie do ramy odniesienia (3).
30. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że rama odniesienia (3) ma postać ramy prostokątnej.
31. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że rama odniesienia (3) ma postać obręczy.
32. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że tarcza pomiarowa (4) ma postać prostokąta.
33. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że tarcza pomiarowa (4) ma postać koła.
34. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że pion laserowy (14) połączony jest z ramą odniesienia (3) w sposób rozłączny, za pomocą śrub sprzęgających (9).
35. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że pion laserowy (14) połączony jest z ramą odniesienia (3) na stałe.
36. Urządzenie według zastrz. 1, **znamienne tym**, że po połączeniu pionu laserowego (14) z ramą odniesienia (3), kartezjańskie układy współrzędnych ramy odniesienia x_r, y_r, z_r i pionu laserowego x_p, y_p, z_p są względem siebie równoległe.

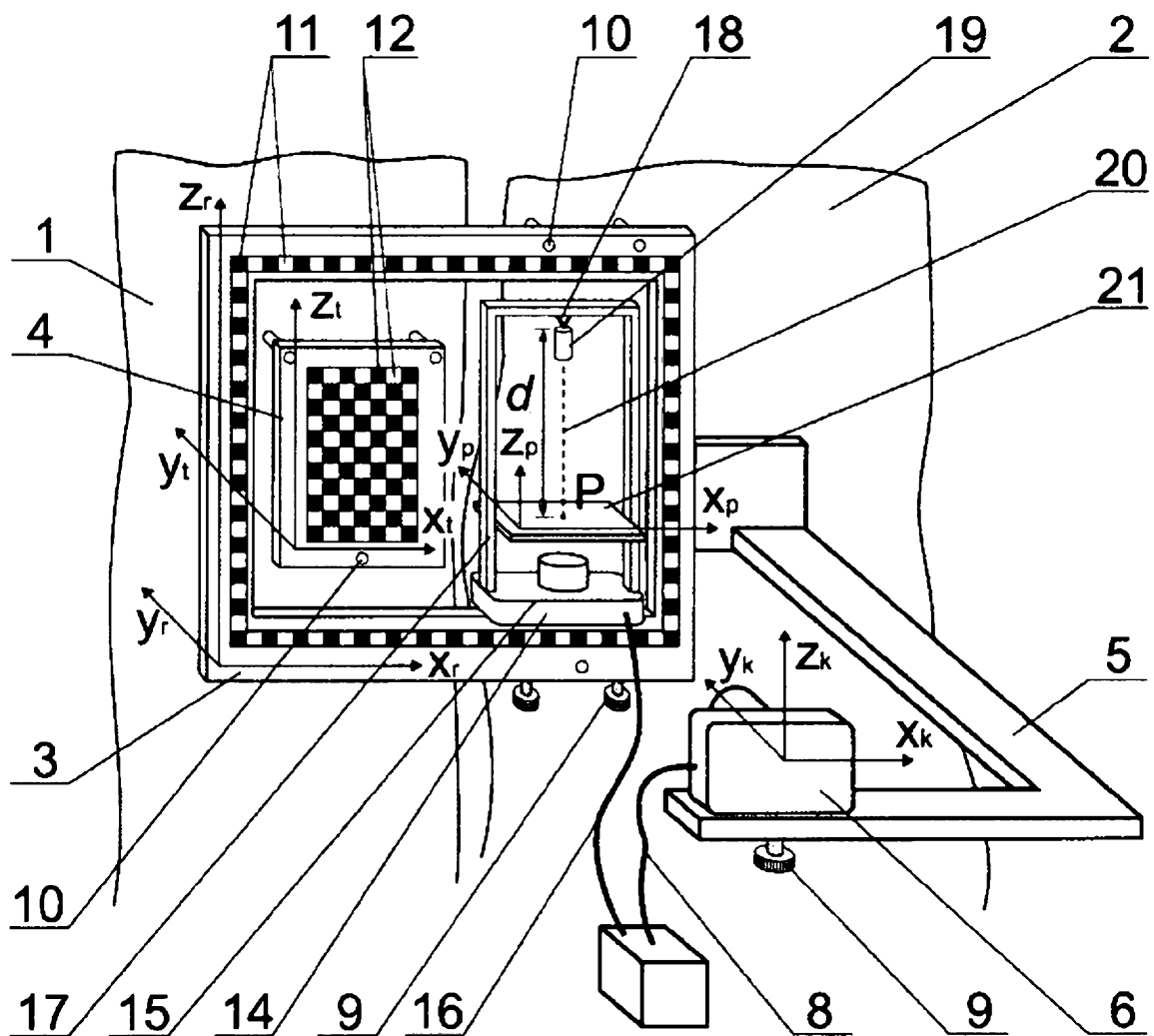


Fig. 2

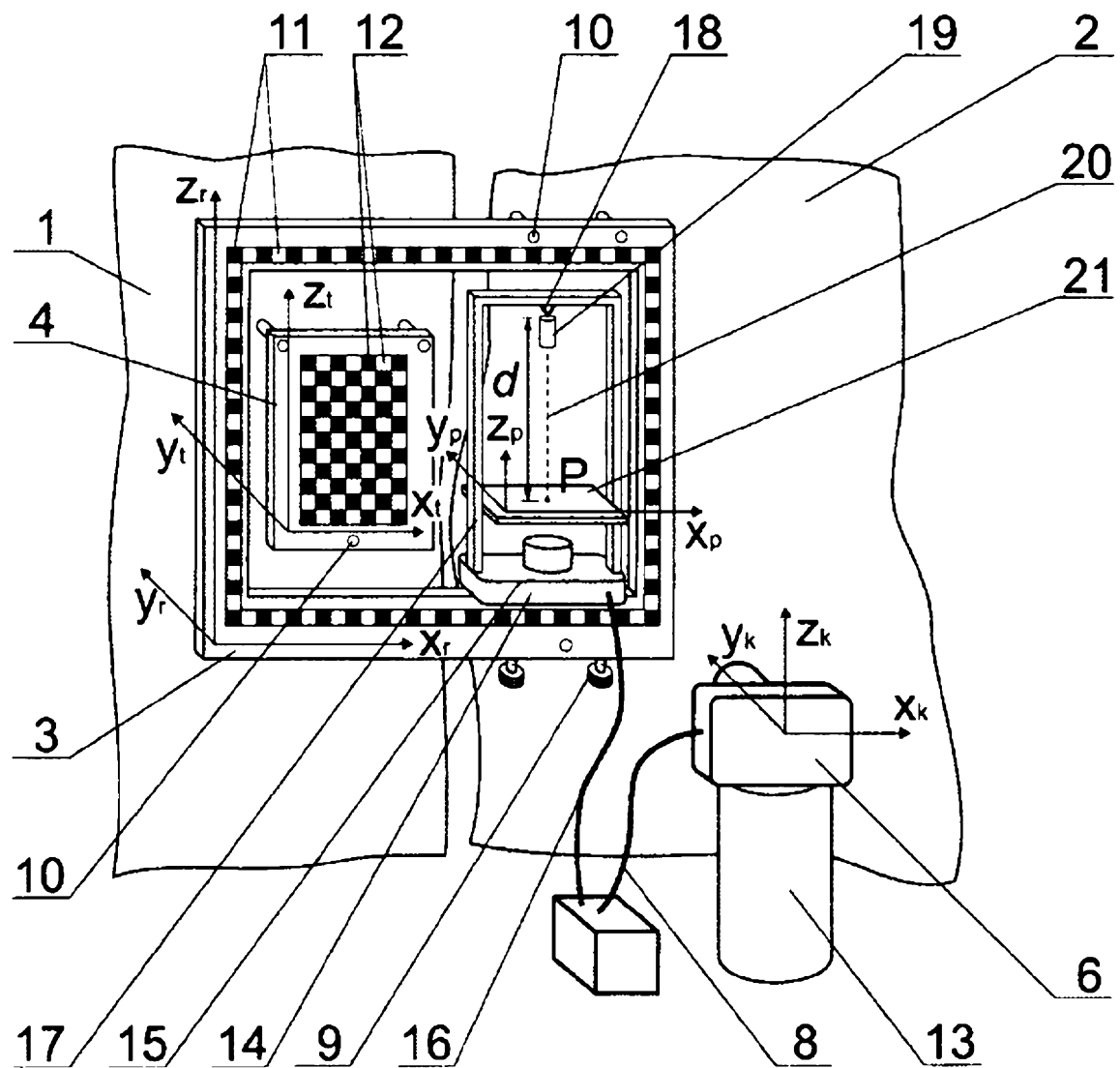


Fig. 3

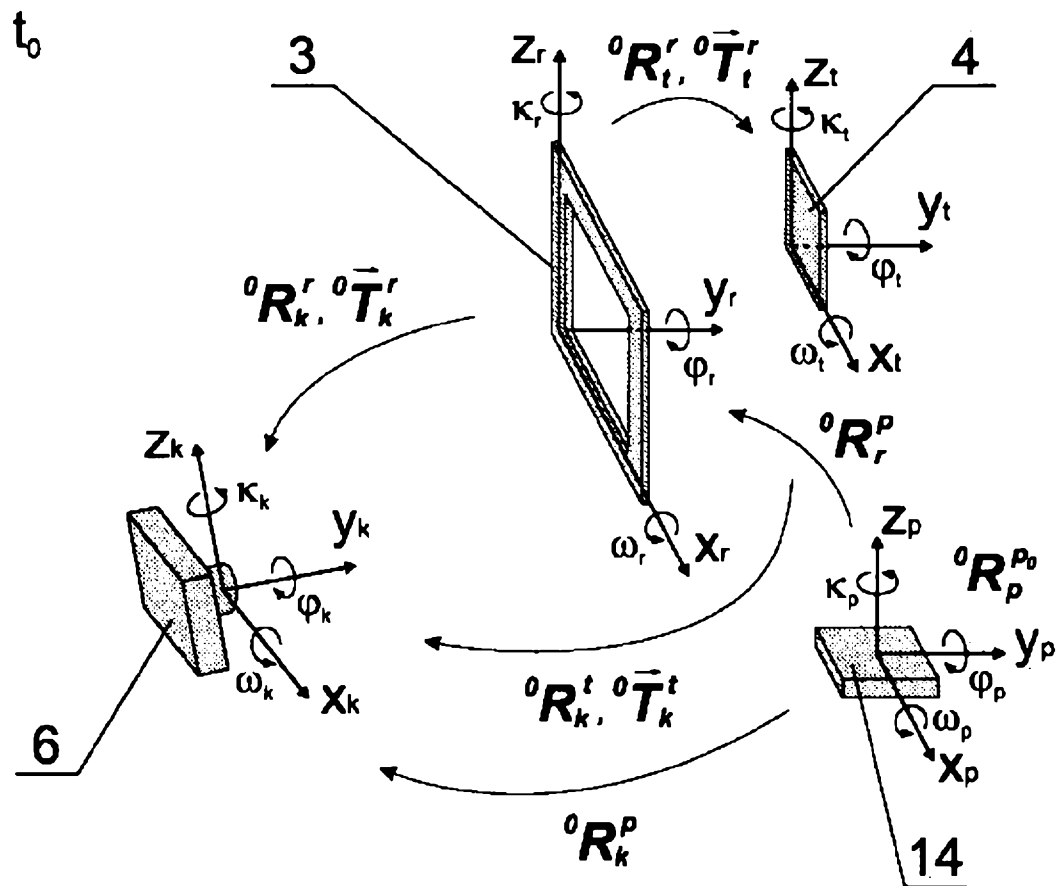


Fig. 4

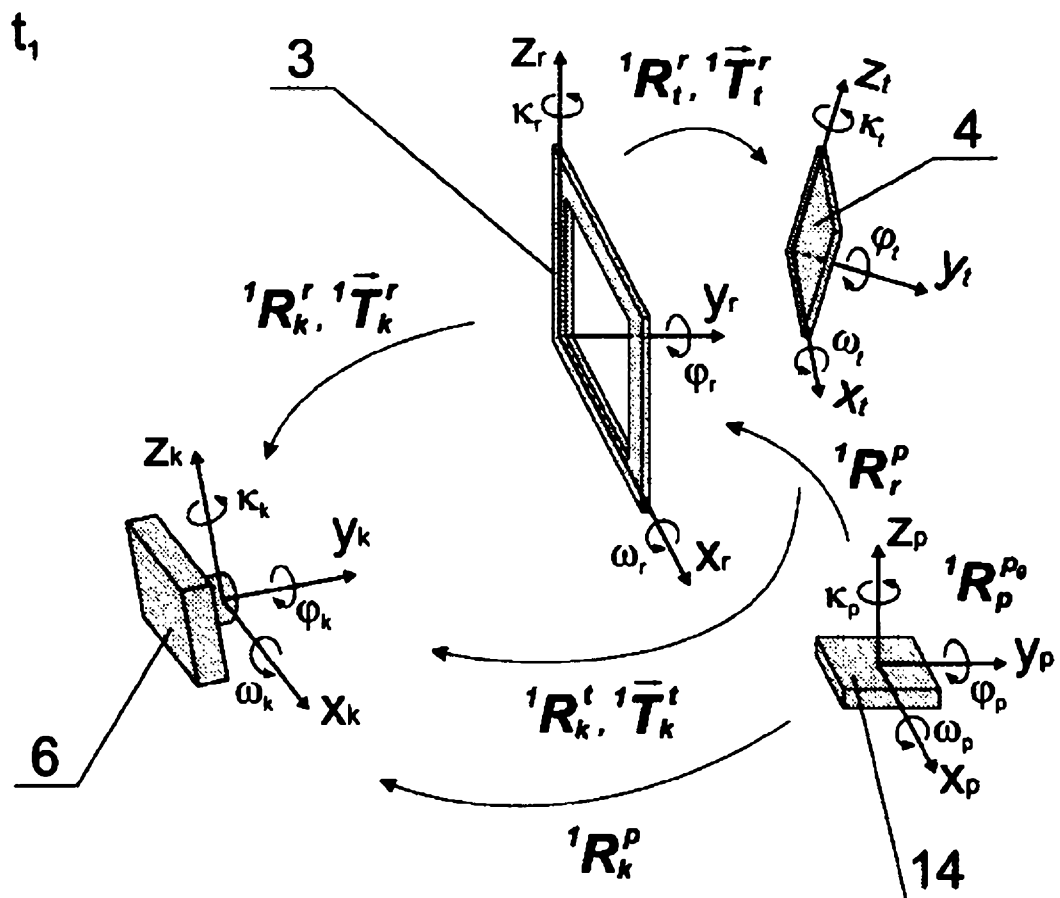


Fig. 5

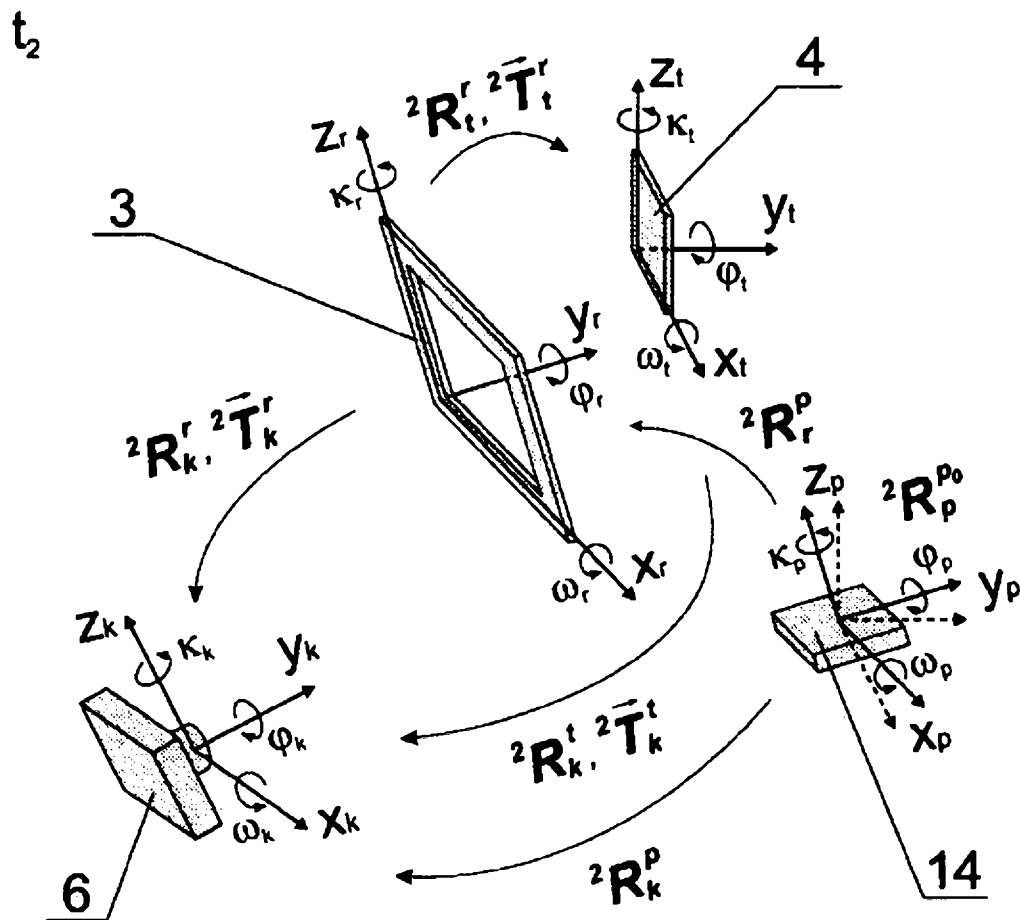


Fig. 6