

(19)



URZĄD  
PATENTOWY  
RZECZYPOSPOLITEJ  
POLSKIEJ

(10) **PL 246642 B1**

(12)

## Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **440869**

(22) Data zgłoszenia: **2022.04.06**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2023.10.09 BUP 41/2023**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2025.02.17 WUP 07/2025**

(51) MKP:

**G01B 9/02** (2022.01)

(73) Uprawniony z patentu:

**POLITECHNIKA WARSZAWSKA, Warszawa, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

**MAREK DOBOSZ, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:

**rzecz. pat. Oliwia Czarnocka, Warszawa, PL**

(54) Tytuł:

**Sposób zadawania precyzyjnych obrotów kątowych z użyciem interferometru laserowego  
w szczególności do kalibracji enkoderów kątowych**

**PL 246642 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób zadawania precyzyjnych obrotów kątowych z użyciem najkorzystniej interferometru laserowego. Proponowany sposób może być zastosowany między innymi do kalibracji (wzorcowania) enkoderów kątowych. Enkodery kątowe (zwane również przetwornikami obrotowo impulsowymi) są to komercyjnie szeroko dostępne urządzenia do pomiaru kąta obrotu w zakresie  $360^\circ$ . Enkoder kątowy zawiera wał lub pierścień, którego kąt obrotu jest mierzony i wskazywany przez to urządzenie w formie elektronicznej w postaci cyfrowej.

Enkodery kątowe jak wszystkie urządzenia pomiarowe poddaje się kalibracji (wzorcowaniu). Polega ona na porównaniu kąta obrotu wskazywanego przez enkoder z urządzeniem referencyjnym. W ten sposób można ustalić błędy wskazań enkodera i ewentualnie je skorygować.

Z opisu znajdującego się na przykład w wytycznych normy (Guidelines on the Calibration of Angular Encoders EURAMET Calibration Guide No. 23 Version 1.0 (02/2018)) znany jest sposób kalibracji enkodera testowanego przy użyciu enkodera wzorcowego polegający na tym, że do obrotowego stołu z jednej jego strony dołączony jest wał testowanego enkodera a z drugiej strony wał enkodera wzorcowego. Korpusy obu enkoderów są zamocowane nieruchomo. Osie obrotu enkoderów i stołu obrotowego pokrywają się. Stół obrotowy napędzany silnikiem lub ręcznie obraca oba wały porównywanych enkoderów. Dla zadawanych w ten sposób kolejno żądanych kątów obrotu dokonuje się rejestracji a następnie porównania kątów wskazanych przez enkoder wzorcowy z enkoderem testowanym.

Wadą tego rozwiązania jest konieczność użycia do kalibracji testowanego enkodera enkodera referencyjnego o wyższej dokładności. Pojawia się więc problem jak skalibrować enkoder bez użycia enkodera referencyjnego gdy np. nie jest dostępne urządzenie o odpowiednio wysokiej dokładności.

Znany jest układ interferometryczny (np.: <https://www.renishaw.pl/pl/interferometr-ze-zwierzciadem-paskim-rld10-6483>) do pomiarów położenia w dwóch prostopadłych osiach (we współrzędnych XY) stołu pozycjonującego. Do platformy ruchomej stołu do dwóch wzajemnie prostopadłych jej boków dołączone są płaskie zwierciadła o długości równej zakresowi przemieszczeń platformy stołu. Pozycję każdego ze zwierciadeł w kierunku prostopadłym do jego płaszczyzny mierzą interferometry laserowe (przy czym mogą być zasilane z jednego źródła światła; (mogą to być np. interferometry RLD10-PMI firmy Renishaw – link podany powyżej)). W ten sposób ustalane są zmiany położenia platformy stolika w dwóch wzajemnie prostopadłych osiach (współrzędnych XY).

Do ustalania położenia XY platformy stolika można zastosować inne odpowiednio precyzyjne metody pomiarowe.

Celem wynalazku jest opracowanie rozwiązania umożliwiającego wzorcowanie testowanego enkodera bez użycia enkodera wzorcowego natomiast przy użyciu układu do pomiaru pozycji we współrzędnych XY najkorzystniej przy użyciu układu interferometrycznego.

Sposób zadawania precyzyjnych obrotów kątowych wału testowanego enkodera kątowego w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi wału do którego zamocowano ramię obracające się wraz z wałem w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi wału, w wyniku przemieszczeń liniowych platformy wymuszanych napędem ręcznym lub silnikowym urządzenia pozycjonującego przemieszczającej się w płaszczyźnie XY, której pozycja w płaszczyźnie przemieszczeń jest mierzona przy pomocy pierwszego liniowego układu pomiarowego i drugiego liniowego układu pomiarowego, a platforma ma dołączony popychacz do wymuszania obrotów kątowych wału testowanego enkodera kątowego za pośrednictwem ramienia a mierzone przez układy pomiarowe współrzędne XY;  $(X_{\alpha_0}; Y_{\alpha_0})$  i  $(X_{\alpha_1}; Y_{\alpha_1})$  w dwóch porównywanych pozycjach kątowych  $\alpha_0$  i  $\alpha_1$  wału przesyłane są do komputera/procesora charakteryzuje się tym, że

zadaje się pozycję początkową  $(X_0; Y_0)$  popychacza, w której to pozycji jego oś pokrywa się w przybliżeniu z osią obrotu ramienia (4), i która to pozycja jest wskazywana przez pierwszy liniowy układ pomiarowy i drugi liniowy układ pomiarowy, następnie

przemieszcza się, przy pomocy platformy, popychacz w kierunku prostopadłym do osi wału o odległość  $r$  do pierwszej pozycji o współrzędnych  $(X_0 + r \cos \alpha_{0z}; Y_0 + r \sin \alpha_{0z})$  mierzonej przez pierwszy liniowy układ pomiarowy i drugi liniowy układ pomiarowy, gdzie  $\alpha_{0z}$  stanowi żądaną pierwszą/początkową pozycją kątową odchylenia popychacza względem osi X,  $r$  jest zadaną ustaloną wartością, a następnie

przemieszcza się, przy pomocy platformy, popychacz do drugiej pozycji określonej współrzędnymi  $(X_0 + r \cos(\alpha_{1z}); Y_0 + r \sin(\alpha_{1z}))$ , mierzonej przez pierwszy liniowy układ pomiarowy i drugi liniowy układ pomiarowy, gdzie  $\alpha_{1z}$  stanowi żądaną drugą/kończącą pozycją kątową odchylenia popychacza względem osi X, a różnicę  $\alpha_{1z} - \alpha_{0z}$  przyjmuje się jako zadany obrót wału (1).

Korzystnie, na podstawie zmierzonych przez układy pomiarowe współrzędnych  $(X_{\alpha_0}; Y_{\alpha_0})$  i  $(X_{\alpha_1}; Y_{\alpha_1})$  w dwóch porównywanych pozycjach kątowych  $\alpha_0$  i  $\alpha_1$  wału przy pomocy komputera (17) wylicza się wartości kątów  $\alpha_0$  i  $\alpha_1$  wału wg zależności

dla pozycji  $(X_{\alpha_0}; Y_{\alpha_0})$

$$\alpha_0 = \arccos \left[ (X_{\alpha_0} - X_0) / \sqrt{(X_{\alpha_0} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_0} - Y_0)^2} \right] \quad \text{lub}$$

$$\alpha_0 = \arcsin \left[ (Y_{\alpha_0} - Y_0) / \sqrt{(X_{\alpha_0} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_0} - Y_0)^2} \right]$$

a dla pozycji  $(X_{\alpha_1}; Y_{\alpha_1})$  odpowiednio w postaci:

$$\alpha_1 = \arccos \left[ (X_{\alpha_1} - X_0) / \sqrt{(X_{\alpha_1} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_1} - Y_0)^2} \right] \quad \text{lub}$$

$$\alpha_1 = \arcsin \left[ (Y_{\alpha_1} - Y_0) / \sqrt{(X_{\alpha_1} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_1} - Y_0)^2} \right]$$

a wygenerowany kąt obrotu wału  $\alpha$  wyznacza się jako różnicę  $\alpha = \alpha_1 - \alpha_0$ .

Korzystnie, obliczony przez komputer/procesor kąt obrotu  $\alpha$  porównuje się z kątem obrotu wskazywanym przez testowany enkoder kątowy.

Korzystnie, linowe układy pomiarowe współrzędnych XY położenia popychacza platformy urządzenia pozycjonującego wykonano jako laserowe układy interferometryczne mierzące położenie zwierciadeł płaskich i wzdłuż osi X i Y przymocowanych do ruchomej platformy.

Wynalazek został przedstawiony w przykładzie wykonania na rysunku, na którym fig 1 przedstawia przekrój poprzeczny i widok z góry urządzenia gdy współrzędne XY środka platformy stolika odpowiadają jego centralnemu położeniu  $(X_0; Y_0)$

fig. 2 przedstawia przekrój poprzeczny i widok z góry urządzenia gdy współrzędne XY środka platformy stolika są przesunięte o odcinek  $r$  do pozycji  $(X_{\alpha_0}; Y_{\alpha_0})$

fig. 3 przedstawia przekrój poprzeczny i widok z góry urządzenia gdy współrzędne XY środka platformy stolika są przesunięte do pozycji  $(X_{\alpha_1}; Y_{\alpha_1})$ .

Do wału (1) testowanego enkodera kątowego (2) zamocowanego na stelażu (3) dołączono prostopadle do osi wału ramię (4) z wyciętym kanałem (5). Ramię (4) obraca się wraz z wałem w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi wału (1). Obroty ramienia (4) a więc i wału (1) enkodera (2) wymuszane są przy pomocy przemieszczeń liniowych XY platformy (6) urządzenia pozycjonującego (7) (przykładowe elementy przedstawiono np. na stronie internetowej <https://www.standa.lt/products/catalog/motorised-positioners?item=311>).

Platforma (6) ma dołączony element popychający/popychacz (8), który umieszczony jest w kanale (5) ramienia (4) i służy do wymuszania obrotów kątowych wału (1).

Przy pomocy napędu ręcznego lub przy pomocy silników urządzenia (7) zmienia się pozycja platformy (6) w prostopadłych osiach X i Y a wraz z nią współrzędne XY zamocowanego na tej platformie popychacza (8), który umieszczony w kanale (5) ramienia (4) wymusza ruch obrotowy tego ramienia.

Platforma (6) ma dołączone na prostopadłych bokach pierwsze zwierciadło płaskie (9) i drugie zwierciadło płaskie (10), których pozycja w płaszczyźnie przemieszczeń jest mierzona przy pomocy pierwszego laserowego układu interferometrycznego (11) i drugiego laserowego układu interferometrycznego (12). Zasada działania takiego interferometru została opisana w wielu publikacjach np. w podręczniku „Handbook of Optical Dimensional Metrology” Edited by Kevin Harding. 1 st edition 2013 CRC Press, <https://doi.org/10.1201/b13855> Rozdział 4 strona 174 rys 4.15.). Działające wg opisanej tam zasady są komercyjnie dostępne urządzenia: np. <https://www.renishaw.pl/pl/interferometr-ze-zwierciadlem-paskim-rld10-6483>).

Pomiary położenia pierwszego zwierciadła (9) i drugiego zwierciadła (10), odbywają się przy pomocy, odpowiednio, pierwszej podwójnej wiązki laserowej (13) i drugiej podwójnej wiązki laserowej (14). Pierwsze zwierciadło płaskie (9), pierwszy układ optyczny (15) i pierwsza podwójna wiązka laserowa (13) tworzą pierwszy laserowy układ interferometryczny (11) mierzący przemieszczenia wzdłuż

osi X. Typowy układ interferometryczny zawiera dwa prostopadłe do siebie ramiona. Monochromatyczne światło ze źródła wpada do wnętrza układu i w centralnej części rozdziela się na dwie wiązki na półprzepuszczalnym zwierciadle. Na końcu obu ramion znajdują się zwierciadła, które zawracają bieg promieni. Drugie zwierciadło płaskie (10), drugi układ optyczny (16) i druga podwójna wiązka laserowa (14) tworzą drugi laserowy układ interferometryczny (12) mierzący przemieszczenia wzdłuż osi Y. Wyniki pomiarów przemieszczeń układów pomiarowych (11) i (12) w postaci współrzędnych odpowiednio X i Y są przesyłane do komputera/procesora 17 i przez niego wyświetlane i rejestrowane.

W sposobie zadawania przemieszczeń kątowych wału (1) najpierw zadaje się pozycję początkową ( $X_0; Y_0$ ) popychacza (8), w której to pozycji jego oś pokrywa się w przybliżeniu z osią obrotu ramienia (4), i która to pozycja jest wskazywana przez pierwszy liniowy układ pomiarowy (11) i drugi liniowy układ pomiarowy (12) (Fig. 1). W następnym etapie, przemieszcza się, przy pomocy platformy (6) popychacz (8) w kierunku prostopadłym do osi wału o odległość  $r$  do pozycji o przybliżonych współrzędnych ( $X_0 + r \cos \alpha_{0z}$ ;  $Y_0 + r \sin \alpha_{0z}$ ), którą wskazują odpowiednio pierwszy liniowy układ pomiarowy (11) i drugi liniowy układ pomiarowy (12), (Fig. 2) przy czym  $\alpha_{0z}$  jest żądanym kątem początkowym ustawienia wału (1),  $r$  jest zadaną ustaloną wartością. W kolejnym etapie, przemieszcza się popychacz (8) za pośrednictwem platformy (6) do pozycji o przybliżonych współrzędnych ( $X_0 + r \cos(\alpha_{1z}); Y_0 + r \sin(\alpha_{1z})$ ), którą wskazują odpowiednio pierwszy liniowy układ pomiarowy (11) (w postaci pierwszego laserowego układu interferometrycznego) i drugi liniowy układ pomiarowy (12) (w postaci drugiego laserowego układu interferometrycznego), (Fig. 3) przy czym  $\alpha_{1z} - \alpha_{0z} = \alpha_z$  stanowi żądany kąt obrotu wału (1) względem ustalonego kąta początkowego  $\alpha_{0z}$ .

Współrzędne położenia ( $X_0 + r \cos \alpha_{0z}$ ;  $Y_0 + r \sin \alpha_{0z}$ ) oraz ( $X_0 + r \cos(\alpha_{1z}); Y_0 + r \sin(\alpha_{1z})$ ) nie muszą być zadawane precyzyjnie. Przeszacowania platformy (6) urządzenia pozycjonującego (7) można zrealizować np. prostym silnikiem krokowym lub nawet ręcznie.

Nominalnej, zadanej pozycji środka platformy określonej teoretycznymi współrzędnymi ( $X_0 + r \cos \alpha_{0z}$ ;  $Y_0 + r \sin \alpha_{0z}$ ) odpowiadają wskazywane przez dokładne układy pomiarowe (11) i (12) współrzędne ( $X_{\alpha_0}$ ;  $Y_{\alpha_0}$ ) środka platformy i odpowiadająca jej dokładna pozycja kątowa wału (1) enkodera  $\alpha_0$ . Podobnie zadanej pozycji określonej współrzędnymi ( $X_0 + r \cos(\alpha_{1z}); Y_0 + r \sin(\alpha_{1z})$ ) odpowiadają wskazywane przez układy pomiarowe (11) i (12) dokładne współrzędne ( $X_{\alpha_1}$ ;  $Y_{\alpha_1}$ ) środka platformy i odpowiadająca jej dokładna pozycja kątowa  $\alpha_1$  wału (1) enkodera.

W sposobie wg wynalazku mierzone/wskazywane przez układy pomiarowe (11) i (12) współrzędne ( $X_{\alpha_0}$ ;  $Y_{\alpha_0}$ ) i ( $X_{\alpha_1}$ ;  $Y_{\alpha_1}$ ) w dwóch porównywanych pozycjach kątowych  $\alpha_0$  i  $\alpha_1$  wału (1) przesyłane są do komputera/procesora (17), w którym wartości kątów  $\alpha_0$  i  $\alpha_1$  wału niezależnie od tego jak były zadane oblicza się wg zależności

dla pozycji ( $X_{\alpha_0}$ ;  $Y_{\alpha_0}$ )

$$\alpha_0 = \arccos \left[ (X_{\alpha_0} - X_0) / \sqrt{(X_{\alpha_0} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_0} - Y_0)^2} \right] \quad \text{lub}$$

$$\alpha_0 = \arcsin \left[ (Y_{\alpha_0} - Y_0) / \sqrt{(X_{\alpha_0} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_0} - Y_0)^2} \right]$$

a dla pozycji ( $X_{\alpha_1}$ ;  $Y_{\alpha_1}$ ) odpowiednio w postaci:

$$\alpha_1 = \arccos \left[ (X_{\alpha_1} - X_0) / \sqrt{(X_{\alpha_1} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_1} - Y_0)^2} \right] \quad \text{lub}$$

$$\alpha_1 = \arcsin \left[ (Y_{\alpha_1} - Y_0) / \sqrt{(X_{\alpha_1} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_1} - Y_0)^2} \right]$$

a zadawany kąt  $\alpha$  wyznacza się jako różnicę  $\alpha = \alpha_1 - \alpha_0$ .

Dwie pozycje kątowe wyznacza się celem określenia różnicy między nimi czyli zadawanego kąta  $\alpha$ .

Zadany kąt obrotu  $\alpha$  traktuje się jako referencyjny i porównuje się z kątem obrotu wskazywanym przez testowany enkoder kątowy (2), wyznaczając błąd wskazań tego enkodera.

Korzystnie, jeżeli linowe układy pomiarowe współrzędnych XY położenia popychacza (8) platformy (6) urządzenia pozycjonującego (7) mierzone są przy pomocy dwóch laserowych układów interferometrycznych (11) i (12) mierzących położenie zwierciadeł płaskich (9) i (10) przymocowanych do ruchomej platformy (6)

### Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób zadawania precyzyjnych obrotów kątowych wału (1) testowanego enkodera kąтового (2) w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi wału (1), do którego zamocowano ramię (4) obracające się wraz z wałem (1) w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi wału (1), w wyniku przemieszczeń liniowych platformy (6) wymuszanych napędem ręcznym lub silnikowym urządzenia pozycjonującego (7) przemieszczającej się w płaszczyźnie XY, której pozycja w płaszczyźnie przemieszczeń jest mierzona przy pomocy pierwszego liniowego układu pomiarowego (11) i drugiego liniowego układu pomiarowego (12), a platforma (6) ma dołączony popychacz (8) do wymuszania obrotów kątowych wału (1) testowanego enkodera kąтового (2) za pośrednictwem ramienia (4) a mierzone przez układy pomiarowe (11) i (12) współrzędne XY;  $(X_{\alpha_0}; Y_{\alpha_0})$  i  $(X_{\alpha_1}; Y_{\alpha_1})$  w dwóch porównywanych pozycjach kątowych  $\alpha_0$  i  $\alpha_1$  wału (1) przesyłane są do komputera/procesora (17)

**znamienny tym, że**

zadaje się pozycję początkową  $(X_0; Y_0)$  popychacza (8), w której to pozycji jego oś pokrywa się w przybliżeniu z osią obrotu ramienia (4), i która to pozycja jest wskazywana przez pierwszy liniowy układ pomiarowy (11) i drugi liniowy układ pomiarowy (12), następnie przemieszcza się, przy pomocy platformy (6), popychacz (8) w kierunku prostopadłym do osi wału (1) o odległość  $r$  do pierwszej pozycji o współrzędnych  $(X_0 + r \cos \alpha_{0z}; Y_0 + r \sin \alpha_{0z})$  mierzonej przez pierwszy liniowy układ pomiarowy (11) i drugi liniowy układ pomiarowy (12), gdzie  $\alpha_{0z}$  stanowi żadaną pierwszą/początkową pozycją kątową odchylenia popychacza (8) względem osi X,  $r$  jest zadaną ustaloną wartością, a następnie przemieszcza się, przy pomocy platformy (6), popychacz (8) do drugiej pozycji określonej współrzędnymi  $(X_0 + r \cos(\alpha_{1z}); Y_0 + r \sin(\alpha_{1z}))$ , mierzonej przez pierwszy liniowy układ pomiarowy (11) i drugi liniowy układ pomiarowy (12), gdzie  $\alpha_{1z}$  stanowi żadaną drugą/kończącą pozycją kątową odchylenia popychacza (8) względem osi X, a różnicę  $\alpha_{1z} - \alpha_{0z}$  przyjmuje się jako zadany obrót wału (1).

2. Sposób wg zastrzeżenia 1 **znamienny tym**, że na podstawie zmierzonych przez układy pomiarowe (11) i (12) współrzędnych  $(X_{\alpha_0}; Y_{\alpha_0})$  i  $(X_{\alpha_1}; Y_{\alpha_1})$  w dwóch porównywanych pozycjach kątowych  $\alpha_0$  i  $\alpha_1$  wału (1) przy pomocy komputera (17) wylicza się wartości kątów  $\alpha_0$  i  $\alpha_1$  wału wg zależności dla pozycji  $(X_{\alpha_0}; Y_{\alpha_0})$

$$\alpha_0 = \arccos \left[ (X_{\alpha_0} - X_0) / \sqrt{(X_{\alpha_0} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_0} - Y_0)^2} \right] \quad \text{lub}$$

$$\alpha_0 = \arcsin \left[ (Y_{\alpha_0} - Y_0) / \sqrt{(X_{\alpha_0} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_0} - Y_0)^2} \right]$$

a dla pozycji  $(X_{\alpha_1}; Y_{\alpha_1})$  odpowiednio w postaci:

$$\alpha_1 = \arccos \left[ (X_{\alpha_1} - X_0) / \sqrt{(X_{\alpha_1} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_1} - Y_0)^2} \right] \quad \text{lub}$$

$$\alpha_1 = \arcsin \left[ (Y_{\alpha_1} - Y_0) / \sqrt{(X_{\alpha_1} - X_0)^2 + (Y_{\alpha_1} - Y_0)^2} \right]$$

a wygenerowany kąt obrotu wału  $\alpha$  wyznacza się jako różnicę  $\alpha = \alpha_1 - \alpha_0$ .

3. Sposób wg zastrzeżenia 2 **znamienny tym**, że obliczony przez komputer/procesor kąt obrotu  $\alpha$  porównuje się z kątem obrotu wskazywanym przez testowany enkoder kątowy (2).
4. Sposób wg zastrzeżenia 1 albo 2, albo 3 **znamienny tym**, że linowe układy pomiarowe (11) i (12) współrzędnych XY położenia popychacza (8) platformy (6) urządzenia pozycjonującego (7) wykonano jako laserowe układy interferometryczne mierzące położenie zwierciadeł płaskich (9) i (10) wzdłuż osi X i Y przymocowanych do ruchomej platformy (6).

### Rysunki

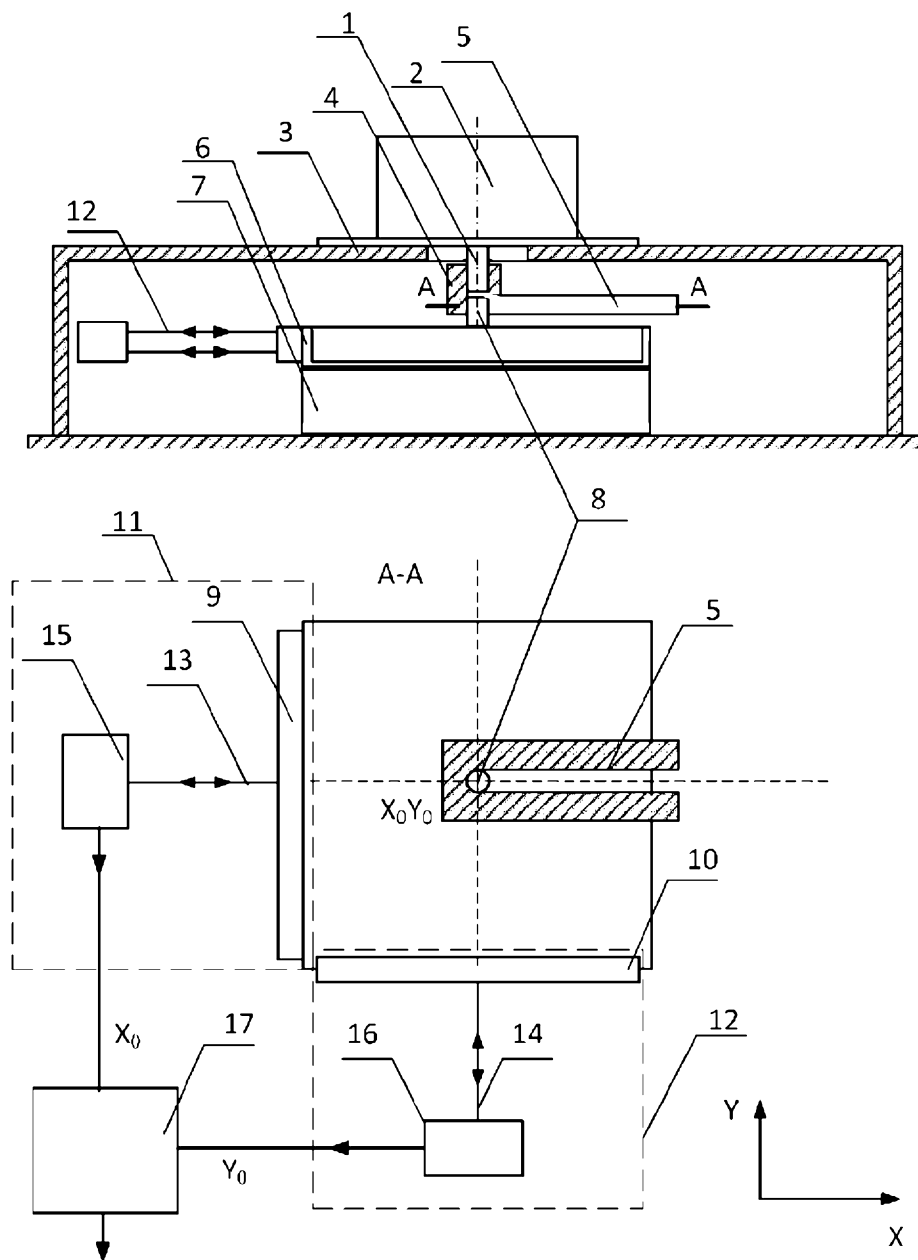


Fig. 1

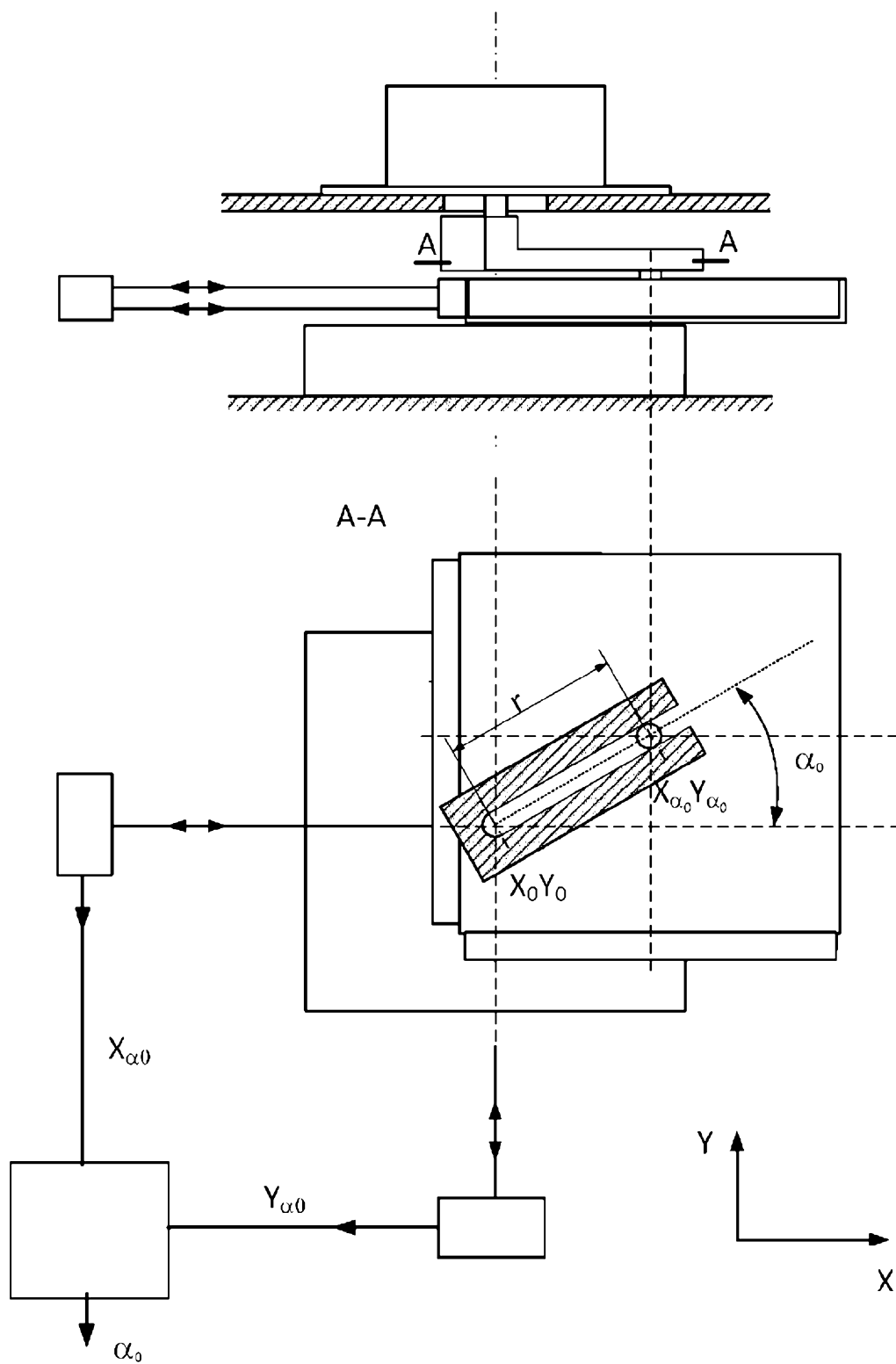


Fig. 2

