

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

Zveřejněná podle §31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

2013-133

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

G01C 25/00 (2006.01)

G01M 11/00 (2006.01)

G03B 43/00 (2006.01)

G03B 17/12 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLVÉHO
VLASTNICTVÍ

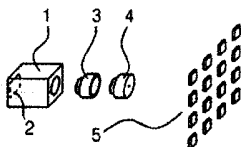
(22) Přihlášeno: **22.02.2013**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **03.09.2014**
(Věstník č. 36/2014)

- (71) Přihlašovatel:
České vysoké učení technické v Praze,
Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie,
Praha 6, CZ
- (72) Původce:
Ing. Jan Řezníček, Praha 2 - Nusle, CZ
- (74) Zástupce:
Ing. Václav Kratochvíl, Husníkova 2086/22, 158 00
Praha 13

(54) Název přihlášky vynálezu:
Způsob kalibrace distorze objektivu

- (57) Anotace:
Při způsobu kalibrace distorze objektivu se využije pomocné kamery (1) a dírkového objektivu (4), který zobrazuje bez distorzí, takže je možné provést komparaci dvou snímků pořízených proměřovaným objektivem (3) a dírkovým objektivem (4) a komparací zjistit distorzi proměřovaného objektivu (3). Způsob kalibrace distorze objektivu (3) je výhodný zejména tím, že neuvažuje parametry vnější orientace kamery (1) vůči kalibračnímu poli a tedy nedochází ke korelacím mezi parametry vnější orientace kamery (1) a parametry funkce aproximující distorzi objektivu (3) a tedy nedochází ke snížení výsledné přesnosti určení těchto parametrů, zejména při kalibraci objektivů (3) s úzkým zorným polem. Další výhodou je, že poloha terčů kalibračního pole se neměří a výsledná chyba parametrů funkce aproximující distorzi objektivu tak není zatížena chybou měření polohy těchto terčů. Způsob kalibrace je velmi jednoduchý, rychlý a dosahuje požadované přesnosti určení parametrů obvyklé pro většinu fotogrammetrických prací s minimálními finančními nároky na vybavení.



CZ 2013 - 133 A3

Způsob kalibrace distorze objektivu

Oblast techniky

Navrhované řešení se týká způsobu kalibrace distorze objektivu, která je nezbytným předpokladem pro využití tohoto objektivu pro měřické účely, zejména v oblasti fotogrammetrie a videometrie.

Dosavadní stav techniky

V dosavadní praxi existuje mnoho způsobů kalibrace distorze objektivu, které se liší potřebným laboratorním vybavením, obtížností a dosažitelnou přesností.

Patrně nejznámější je laboratorní metoda využívající optický přístroj goniometr s pohyblivým dalekohledem. Postupuje se tak, že se nejprve umístí kamera s nasazeným objektivem na platformu goniometru tak, aby vstupní pupila objektivu, odpovídající paraxiálním paprskům, ležela nad vertikální osou goniometru. Místo kazety upevňující film v obrazové rovině se instaluje tzv. reseau deska, tj. skleněná deska s vyleptanými křížky v pravidelném rastru, kde poloha křížků je známa s vysokou přesností. Potom se pohybem dalekohledu kolem vertikální osy goniometru cílí skrze objektiv postupně na každý křížek na desce a přitom se odečítá horizontální úhel dalekohledu. Z naměřených rozdílů mezi úhlovou pozicí dalekohledu a odpovídajícími úhly mezi vstupní pupilou objektivu a křížky na desce se určí distorze objektivu. Nejčastější varianta této metody je založena na záměně goniometru za soustavu několika přesně usazených kolimátorů, zacílených na vstupní pupilu objektivu. Místo tzv. reseau desky se do kamery vkládá kazeta s filmem a exponuje se. Z odečtených snímkových souřadnic bodů vytvořených kolimátory a známými úhly mezi kolimátory je zjištěna distorze. Pro kamery s digitálním záznamem obrazu je tato metoda nevhodná, protože senzor kamery není možné vyjmout a nahradit jej reseau mřížkou. Cena laboratorních přístrojů pro tento způsob kalibrace je velmi vysoká a proto je takové pracoviště obvykle vázáno na výrobce profesionálních měřických kamer.

V oblasti fotogrammetrie a videometrie se také používá metod analytické kalibrace distorze objektivu, které jsou založeny na řešení obecně známých rovnic projektivní transformace, rozšířených pro účely analytické kalibrace o hledané parametry vnitřní orientace kamery, včetně distorze objektivu. Rovnice projektivní transformace vyjadřují vztah mezi 3-dimenzionálními Kartézskými souřadnicemi X, Y, Z bodu v předmětovém prostoru a snímkovými souřadnicemi x, y v obrazové rovině. Při tomto způsobu kalibrace se obvykle postupuje tak, že se z několika různých stanovisek vyfotografuje kalibrační pole, které se skládá z několika desítek terčů z reflexní fólie kruhového tvaru, standardně využívaných ve fotogrammetrii. Poloha těchto terčů je v daném souřadnicovém systému známa s vysokou přesností. Ze znalosti polohy těchto terčů v prostoru a snímkových souřadnic jejich obrazů v rovině senzoru se pomocí rovnice projektivní transformace vypočtou parametry vnitřní orientace kamery, včetně distorze objektivu. Hlavní nevýhodou metod analytické kalibrace kamer je skutečnost, že rovnice projektivní transformace obsahují kromě hledaných parametrů vnitřní orientace kamery také parametry vnější orientace kamery, tedy parametry rotace a translace kamery definující polohu kamery vůči geodeticky zaměřeným terčům kalibračního pole. Tyto parametry často vysoce korelují s vnitřními parametry, což snižuje přesnost kalibrace, případně ji vůbec znemožňuje. Zejména pro objektivy s úzkým zorným polem je taková metoda nepoužitelná. Další nevýhodou je nutnost přesného zaměření kalibračního pole, obvykle s přesností 0.03 až 0.5 mm v případě kalibračního pole o velikosti několika metrů pro pozemní fotogrammetrii, nebo s přesností přibližně 1 až 5 cm v případě velkého kalibračního pole v terénu pro kalibraci leteckých kamer. Existuje také velmi rozšířená varianta metody analytické kalibrace kamery, tzv. „self-calibration“ metoda, která sice nevyžaduje přesně zaměřené kalibrační pole, ale stále platí limitace ve vysoké korelaci parametrů vnější a vnitřní orientace kamery. Další nevýhodou je skutečnost, že přesnost metody „self-calibration“ kolísá v závislosti na konfiguraci stanovisek snímání měřeného objektu a často je konfigurace tak nevhodná, že není možné tuto metodu vůbec použít. Největší nevýhodou metod analytické kalibrace kamer je skutečnost, že je třeba dopředu znát funkci aproximující distorzi objektivu. Většinou se používá obecná varianta známá z literatury, např. v [Brown, D.C., DBA Systems, Inc.: *Advanced Methods for the Calibration of Metric Cameras, Final Technical Report, Part 1* for U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia, USA, 1968]. U některých objektivů je

však tato aproximace nevhodná, zejména pokud je třeba kalibrovat distorzi pro velký rozsah měřítek zobrazovací soustavy.

Podstata vynálezu

Výše uvedené nevýhody odstraňuje způsob kalibrace distorze podle předkládaného řešení, kde snímacím komponentem kamery je senzor v těle kamery a zobrazovacím komponentem je proměřovaný objektiv. Podstatou nového řešení je, že se využije pomocné kamery a dírkového objektivu, který je známý tím, že zobrazuje bez distorzí, takže je možné provést komparaci dvou snímků pořízených proměřovaným objektivem a dírkovým objektivem a komparací zjistit distorzi objektivu. Nejprve se z jedné stabilní neměnné polohy kamery vyfotografují dva snímky kalibračního pole. Kalibrační pole se skládá z několika desítek terčů z reflexní fólie kruhového tvaru, standardně využívaných ve fotogrammetrii. Tyto terče jsou umístěné před kamerou, v jedné rovině rovnoběžné se senzorem kamery a v pracovní vzdálenosti definované požadovaným měřítkem zobrazení. Rozmístění terčů je zvoleno tak, aby jejich obraz rovnoměrně pokrýval plochu senzoru. První snímek se fotografuje kamerou s nasazeným dírkovým objektivem a druhý snímek kamerou ve stejné poloze, ale s nasazeným proměřovaným objektivem. Na obou snímcích se odečtou snímkové souřadnice středů kalibračních terčů. Tím vzniknou dva soubory různých hodnot pro shodné terče. První soubor snímkových souřadnic se transformuje změnou měřítka a translací na druhý soubor měření tak, aby euklidovská norma rozdílu druhého souboru souřadnic a transformovaného prvního souboru souřadnic byla minimální. Po této transformaci, která slouží k eliminaci rozdílné konstanty kamery proměřovaného a dírkového objektivu a také rozdílného průsečíku hlavní osy proměřovaného a dírkového objektivu s rovinou senzoru, se zvolí taková funkce aproximující distorzi objektivu, která transformuje již jednou transformovaný první soubor souřadnic tak, aby euklidovská norma rozdílu druhého souboru souřadnic a podruhé transformovaného prvního souboru souřadnic byla menší než je požadovaná hodnota daná např. apriorním rozbořem chyb. Tím je kalibrace distorze objektivu pro zvolené měřítko hotova. Konstantou kamery se nazývá vzdálenost vstupní pupily objektivu od senzoru kamery ve směru kolmice k senzoru.

Navrhovaný způsob kalibrace distorze objektivu je výhodný zejména tím, že neuvažuje parametry vnější orientace kamery vůči kalibračnímu poli a tedy nedochází ke korelacím mezi parametry vnější orientace kamery a parametry funkce aproximující distorzi objektivu a tedy nedochází ke snížení výsledné přesnosti určení těchto parametrů, zejména při kalibraci objektivů s úzkým zorným polem. Další výhodou je skutečnost, že poloha terčů kalibračního pole se neměří a výsledná chyba parametrů funkce aproximující distorzi objektivu tak není zatížena chybou měření polohy těchto terčů. Navržený způsob kalibrace je velmi jednoduchý, rychlý a dosahuje požadované přesnosti určení parametrů obvyklé pro většinu fotogrammetrických prací s minimálními finančními nároky na vybavení.

Přehled Objasnění obrázků na výkresech

Navržený způsob kalibrace distorze objektivu je blíže objasněn na výkresech. Obr. 1 znázorňuje uspořádání jednotlivých komponent a jejich umístění. Na obr. 2A je znázorněna poloha středu symetrie distorze vůči senzoru, konstanta kamery a vstupní pupila v případě kamery s dírkovým objektivem a na obr. 2B v případě kamery s nasazeným proměřovaným objektivem. Na obr. 3A, resp. 3B. je znázorněn obraz kalibračního pole na senzoru vytvořený dírkovým objektivem, resp. proměřovaným objektivem.

Příklad uskutečnění vynálezu

Navrhovaný způsob kalibrace distorze objektivu lze ukázat na následujícím příkladu. Podle obr. 1 se soustava pomocné kamery 1 s proměřovaným objektivem 3, který je předmětem kalibrace, skládá z těla kamery 1 a proměřovaného objektivu 3. V těle kamery 1 je umístěn snímací senzor 2. Pomocným komponentem pro kalibraci navrhovanou metodou je dírkový objektiv 4 se stejným typem upevnění k tělu kamery 1 a s konstantou kamery 1 blíží se stejné hodnotě jako u proměřovaného objektivu 3. Vstupní pupila 6 resp. 7 dírkového objektivu 4, resp. proměřovaného objektivu 3 je zobrazena na obr. 2A resp. 2B. Nejprve se z jedné polohy kamery 1 pevně upevněné na stativu nebo stabilním pilíři vyfotografují dva snímky kalibračního pole 5. Kalibrační pole 5 se skládá z několika desítek terčů z reflexní fólie kruhového tvaru, standardně

využívaných ve fotogrammetrii. Tyto terče jsou umístěné před kamerou 1, v jedné rovině rovnoběžné se senzorem 2 kamery 1 a v pracovní vzdálenosti definované požadovaným měřítkem zobrazení. Rozmístění terčů je zvoleno tak, aby jejich obraz rovnoměrně pokrýval plochu senzoru 2. Poloha terčů se nijak nezaměřuje. První, komparační, snímek 8 zobrazený na obr. 3A se fotografuje kamerou 1 s nasazeným dírkovým objektivem 4. Druhý snímek 9 zobrazený na obr. 3B se fotografuje, po záměně objektivů, stejnou kamerou 1 avšak s nasazeným proměřovaným objektivem 3. Výměna objektivů 4, 3 se provede tak, aby nedošlo ke změně polohy těla kamery 1 a tím i polohy senzoru 2 kamery 1. Provede se odečtení snímkových souřadnic $x_{xy_{2i}}, y_{xy_{2i}}, x_{xy_{1i}}, y_{xy_{1i}}$ středů terčů kalibračního pole 5 na obou snímcích 8 a 9, kde $i = 1, 2, \dots, N$, kde N je počet terčů, v popisovaném příkladě např. $N = 100$. Tím vzniknou dva soubory snímkových souřadnic různých hodnot pro shodné terče. Dále se první soubor souřadnic transformuje změnou měřítka a translací tak, aby euklidovská norma rozdílu druhého souboru souřadnic a transformovaného prvního souboru souřadnic byla minimální (2). Tím se eliminuje rozdílná velikost konstanty kamery 1 proměřovaného objektivu 3 a dírkového objektivu 4 a také rozdílný průsečík hlavní osy proměřovaného objektivu 3 a dírkového objektivu 4 s rovinou senzoru 2. Tato transformace se provede podle obecně známého postupu:

$$xy'_1 = tfm_1 \cdot xy_1 \quad (1)$$

kde $tfm_1 = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & t_x \\ 0 & \lambda & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, kde λ značí změnu měřítka, t_x, t_y značí posun v ose x a y , a

xy_1 je první soubor snímkových souřadnic v homogenní podobě. Parametry transformace λ, t_x, t_y jsou vypočteny tak, aby platil vztah:

$$\|(xy_2 - xy'_1)\| = minimum \quad (2)$$

kde xy_2 je druhý soubor snímkových souřadnic rovněž v homogenní podobě. Vztah (2) se řeší obecně známými postupy z vyrovnávacího počtu, jako např. v: [Böhm, J., Radouch, V., Hampacher, M.: *Vyrovnávací počet, SNTL, Praha 1990*].

Dále se zvolí vhodná funkce f_c tak, aby platil vztah:

$$\| (xy_2 - xy_1'') \| \leq d, \quad \text{kde } xy_1'' = fc(xy_1', xy_1^0, K, P) \quad (3)$$

Funkce fc se volí tak, aby hodnota d nepřekročila požadovanou toleranci, např. 5 μm . V tomto příkladě byl za funkci fc zvolen polynom, publikovaný v: [Brown, D.C., DBA Systems, Inc.: *Advanced Methods for the Calibration of Metric Cameras, Final Technical Report, Part 1* for U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, Fort Belvoir, Virginia, USA, 1968], který je ve fotogrammetrické praxi zdaleka nejpoužívanější. Tento polynom obsahuje koeficienty K aproximující radiální průběh distorze objektivu a koeficienty P aproximující nepřesnost centrace jednotlivých optických členů objektivu. Potom platí:

$$xy_{1i}'' = fc(xy_{1i}', xy_1^0, K, P) = \begin{bmatrix} r_i \cdot K^T & 0 & 0 \\ 0 & r_i \cdot K^T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} xy_{1i}' + M_i P^T \quad (4)$$

kde

$$M_i = \begin{bmatrix} r_i^2 + 2(x_{xy_{1i}'} - x_{xy_1^0})^2 & 2(x_{xy_{1i}'} - x_{xy_1^0})(y_{xy_{1i}'} - y_{xy_1^0}) \\ 2(x_{xy_{1i}'} - x_{xy_1^0})(y_{xy_{1i}'} - y_{xy_1^0}) & r_i^2 + 2(y_{xy_{1i}'} - y_{xy_1^0})^2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K = [1 \quad K_1 \quad K_2 \quad K_3], \quad P = [P_1 \quad P_2] \quad (6)$$

$$r_i = [1 \quad r_i^2 \quad r_i^4 \quad r_i^6] \quad (7)$$

kde

$$r_i = \| xy_{1i}' - xy_1^0 \| \quad (8)$$

kde xy_1^0 jsou snímkové souřadnice středu symetrie distorze a $x_{xy_{1i}'}, y_{xy_{1i}'}, x_{xy_1^0}, y_{xy_1^0}$ jsou x a y komponenty vektorů xy_{1i}' a xy_1^0 .

Koeficienty Brownova polynomu K, P a snímkové souřadnice středu symetrie distorze xy_1^0 jsou vypočteny tak, aby platil výše uvedený vztah (3). Tento výpočet se řeší obecně známými postupy z vyrovnávacího počtu, jako např. v: [Böhm, J., Radouch, V., Hampacher, M.: *Vyrovnávací počet, SNTL, Praha 1990*]. Výpočtem koeficientů

Browna polynomu K , P aproximujících distorzi objektivu a snímkových souřadnic středu symetrie distorze xy_1^0 , je kalibrace pro zvolené měřítko zobrazení hotova. V případě, že by nebylo možné splnit vztah (3), musela by se vybrat vhodnější funkce aproximující distorzi objektivu.

Velikost konstanty kamery $\underline{1} f_1$ s nasazeným dírkovým objektivem $\underline{4}$ se upravuje pomocí prodlužovacích kroužků se stejným závitem tak, aby splňovala dále uvedené podmínky ve vztahu ke konstantě kamery $\underline{1} f_2$ s nasazeným proměřovaným objektivem $\underline{3}$. V případě, kdy je $f_1 > f_2$, má zobrazovací soustava s f_1 větší zvětšení a dokáže tedy zobrazit pouze část toho předmětového prostoru, co soustava s f_2 . V praxi to znamená, že zobrazovací soustava s f_1 zobrazí menší počet kalibračních terčů. Kalibrované hodnoty budou tedy platné pouze pro část obrazu, obsahující kalibrační terče zobrazené na obou snímcích. Velikost f_1 musí být tedy zvolena tak, aby kalibrované hodnoty byly platné minimálně pro požadovanou část obrazu, např. obvyklých 90 %. V případě, kdy je $f_1 < f_2$, má zobrazovací soustava s f_1 menší zvětšení a obraz kalibračních terčů je tedy úměrně menší, což vede ke snížení přesnosti odečtených snímkových souřadnic těchto terčů a následně ke snížené přesnosti hledaných kalibrovaných hodnot. Velikost f_1 musí být tedy zvolena zároveň tak, aby byl splněn požadavek na přesnost kalibrovaných hodnot, získaný rozбором přesnosti podle zákonů teorie chyb.

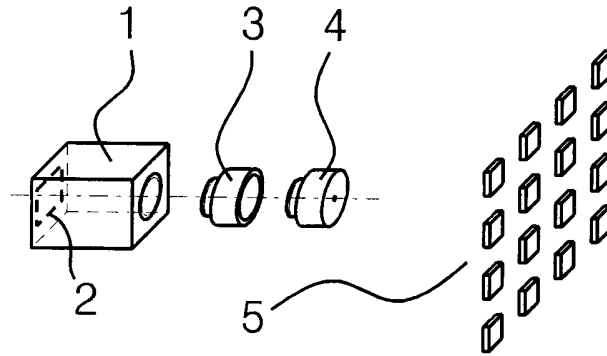
Navrhovaný způsob kalibrace distorze objektivu je výhodný zejména tím, že neuvažuje parametry vnější orientace kamery vůči kalibračnímu poli a tedy nedochází ke korelacím mezi parametry vnější orientace kamery a parametry funkce aproximující distorzi objektivu a tedy nedochází ke snížení výsledné přesnosti určení těchto parametrů, zejména při kalibraci objektivů s úzkým zorným polem. Další výhodou je skutečnost, že poloha terčů kalibračního pole se neměří a výsledná chyba parametrů funkce aproximující distorzi objektivu tak není zatížena chybou měření polohy těchto terčů. Navržený způsob kalibrace je velmi jednoduchý, rychlý a dosahuje požadované přesnosti určení parametrů obvyklé pro většinu fotogrammetrických prací s minimálními finančními nároky na vybavení.

Průmyslová využitelnost

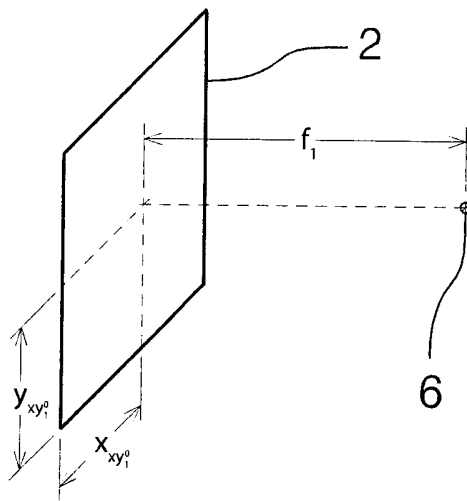
Navržený způsob kalibrace distorze objektivu je možné využít pro kalibraci těchto objektivů, které se používají pro měřické účely, zejména v oblasti fotogrammetrie a videometrie. Navržený způsob je vhodný zejména pro objektivy s úzkým zorným polem.

PATENTOVÉ NÁROKY

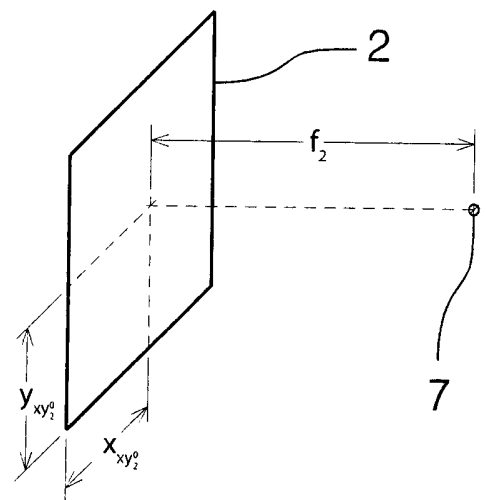
1. Způsob kalibrace distorze objektivu, **vyznačující se tím, že se z jedné stabilní neměnné polohy pomocné kamery (1), obsahující snímací senzor (2) a objímku pro připojení proměřovaného objektivu (3) i pomocného dírkového objektivu (4), vyfotografují dva snímky kalibračního pole (5) tvořeného terči, běžně využívanými ve fotogrammetrii, umístěnými před pomocnou kamerou (1) v jedné rovině rovnoběžné se snímacím senzorem (2) pomocné kamery a v pracovní vzdálenosti definované požadovaným měřítkem zobrazení proměřovaného objektivu (3) rozmístěné tak, aby jejich obraz rovnoměrně pokrýval plochu snímacího senzoru (2), přičemž první snímek (8) se fotografuje pomocnou kamerou (1) s nasazeným dírkovým objektivem (4) a druhý snímek (9) pomocnou kamerou (1) ve stejné poloze, ale s nasazeným proměřovaným objektivem (3), na obou snímcích (8, 9) se potom odečtou snímkové souřadnice středů kalibračních terčů, čímž vzniknou dva soubory různých hodnot pro shodné terče, kde první soubor snímkových souřadnic se transformuje změnou měřítka a translací na druhý soubor měření tak, aby euklidovská norma rozdílu druhého souboru souřadnic a transformovaného prvního souboru souřadnic byla minimální a po této transformaci, která slouží k eliminaci rozdílné konstanty pomocné kamery (1), což je vzdálenost vstupní pupily proměřovaného objektivu (3) od snímacího senzoru (2) pomocné kamery (1) ve směru kolmice ke snímacímu senzoru (2), proměřovaného objektivu (3) a dírkového objektivu (4) a také rozdílného průsečíku hlavní osy proměřovaného objektivu (3) a dírkového objektivu (4) s rovinou snímacího senzoru (2), se zvolí taková funkce aproximující distorzi proměřovaného objektivu (3), která transformuje již jednou transformovaný první soubor souřadnic tak, aby euklidovská norma rozdílu druhého souboru souřadnic a podruhé transformovaného prvního souboru souřadnic byla menší než je požadovaná hodnota daná zadáním, čímž je kalibrace distorze proměřovaného objektivu (3) pro zvolené měřítko zobrazení hotova.**



Obr. 1



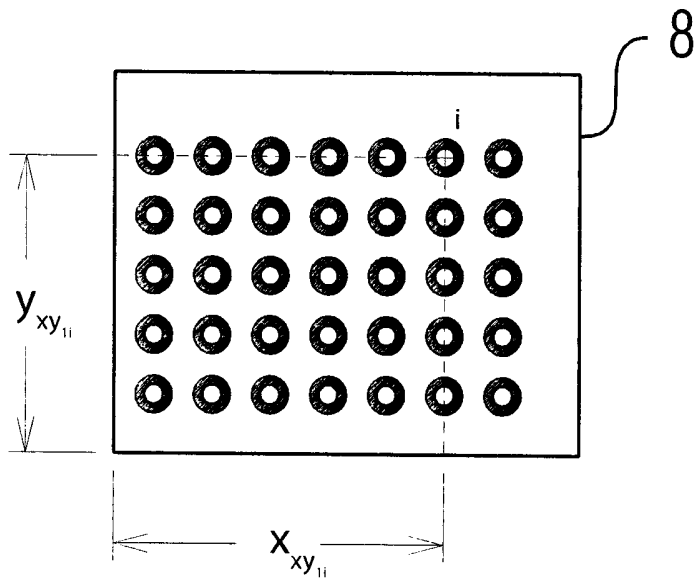
Obr. 2A



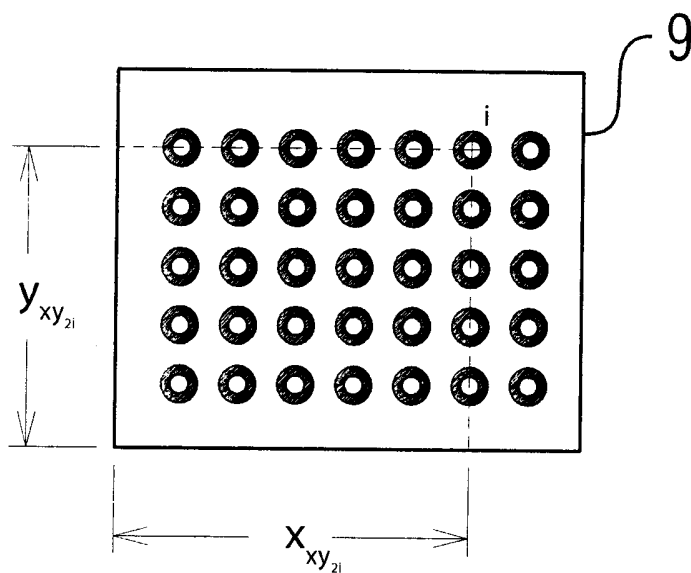
Obr. 2B

7/32

1/2



Obr. 3A



Obr. 3B