POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Dispositivo tastatore e procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore per la misura di oggetti di grandi dimensioni

Original
Dispositivo tastatore e procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore per la misura di oggetti di grandi dimensioni / Maisano, D.A.F., Mastrogiacomo, L., Galetto, M., Franceschini, F.. - (2016).

Availability:
This version is available at: 11583/2729212 since: 2019-03-22T12:50:13Z

Publisher:

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

11 November 2026

Loredana Guglielmetti Firmato da: uibm-brevetti
Roma. 13 marzo 2019

mise.AOO_PIT.REGISTRO UFFICIALE.U.0058110.13-03-2019

Ministero dello Sviluppo Economico

Direzione generale per la lotta alla contraffazione

Ufficio Italiano Brevetti e Marchi

ATTESTATO DI BREVETTO PER INVENZIONE INDUSTRIALE

Il presente brevetto viene concesso per l'invenzione oggetto della domanda:

N. 102016000107650

TITOLARE/I:	• POLITECNICO DI TORINO 100.0%
	Camolese Marco
DOMICILIO:	Metroconsult S.r.l. via Sestriere 100 10060 None
INVENTORE/I:	• MAISANO Domenico Augusto • MASTROGIACOMO Luca • GALETTO Maurizio • FRANCESCHINI Fiorenzo
TITOLO:	Dispositivo tastatore e procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore per la misura di oggetti di grandi dimensioni
CLASSIFICA:	G01B11
DATA DEPOSITO:	25/10/2016

Roma, 13/03/2019

Il Dirigente della Divisione VII
Loredana Guglielmetti

Ministero dello Sviluppo Economico

Ricevuta di presentazione

per

Brevetto per invenzione industriale

Domanda numero: 102016000107650

Data di presentazione: 25/10/2016

DATI IDENTIFICATIVI DEL DEPOSITO

Ruolo	Mandatario
Data di compilazione	25/10/2016
Titolo	Dispositivo tastatore e procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore per la misura di oggetti di grandi dimensioni
Carattere domanda	Ordinaria
Esenzione	NO
Accessibilità al pubblico	NO
Numero rivendicazioni	4
Autorità depositaria	

RICHIEDENTE/I

Natura giuridica	Persona giuridica
Denominazione	POLITECNICO DI TORINO
Partita IVA	00518460019
Nazione sede legale	Italia
Tipo Società	le universita'
Quota percentuale	100.0%

DOMICILIO ELETTIVO

Cognome/R.sociale	Metroconsult S.r.l.
Indirizzo	via Sestriere 100
CAP	10060
Comune	None
Telefono	011 - 9904174

Fax	011 - 9904182
Indirizzo Email	metroc@xero.it
Indirizzo PEC	
Riferimento depositante	PLT031

MANDATARI/RAPPRESENTANTI

Cognome	Nome
Baroni	Matteo
Borsano	Corrado
Ferroni	Filippo
Reposio	Giancarlo
Camolese	Marco

INVENTORI

Cognome	Nome	Nazione residenza
MAISANO	Domenico Augusto	Italia
MASTROGIACOMO	Luca	Italia
GALETTO	Maurizio	Italia
FRANCESCHINI	Fiorenzo	Italia

CLASSIFICAZIONI

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo

NUMERO DOMANDE COLLEGATE

DOCUMENTAZIONE ALLEGATA

Tipo documento	Riserva	Documento
Rivendicazioni	NO	PLT031 _IT RIVENDICAZIONI.pdf.p7m hash: 787bb7c744f191350cbd37cf3b6763f3
Riassunto	NO	PLT031 _IT RIASSUNTO.pdf.p7m hash: 81ac5710d5838f623c79c231a5b14980
Descrizione in italiano*	NO	PLT031 _IT DESCRIZIONE.pdf.p7m hash: c396ca3ca097d69bf82eed13ee425bac
Disegni	NO	PLT031 Figure.pdf.p7m hash: 8911cb311a3738ca52112e08c5b4e0d8
Lettera di Incarico	SI	hash:
Rivendicazioni in inglese	SI	hash:

PAGAMENTI

Tipo	Identificativo	Data
Bollo	01120289003971	11/10/2016

ESENZIONI INDICATE

Esenzione su diritti e tasse	DM 02/04/2007 - art. 2: esonero dal pagamento dei diritti di deposito e di trascrizione relativamente ai brevetti per invenzioni industriali, e modelli di utilita' a vantaggio di: Universita'; Amministrazioni Pubbliche aventi fra i loro scopi istituzionali finalita' di ricerca; Amministrazioni della Difesa; Amministrazioni delle Politiche Agricole, alimentari e forestali.

DESCRIZIONE DELL'INVENZIONE INDUSTRIALE dal titolo –PLT031-
"Dispositivo tastatore e procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore per la misura di oggetti di grandi dimensioni"

a nome di Politecnico di Torino
di nazionalità italiana
con sede in Corso Duca Degli Abruzzi 24 - 10129 Torino elettivamente domiciliato, ai fini del presente incarico, presso i Mandatari Matteo BARONI (No. Iscr. Albo 1064BM), Mirco BIANCO (No. Iscr. Albo 1639B), Corrado BORSANO (No. Iscr. Albo 446BM), Marco CAMOLESE (No. Iscr. Albo 882BM), Filippo FERRONI (No. Iscr. Albo 530BM) e Giancarlo REPOSIO (No. Iscr. Albo 1168BM) c/o Metroconsult S.r.l., Via Sestriere 100, 10060 NONE (TO).
Inventori:
- MAISANO Domenico Augusto, Corso Einaudi 55, 10129, Torino, nazionalità italiana;
- MASTROGIACOMO Luca, Via Thaon di Revel 11, 10090, San Raffaele Cimena (TO), nazionalità italiana;
- GALETTO Maurizio, Via Torino 16, 10040, La Cassa (TO), nazionalità italiana;
- FRANCESCHINI Fiorenzo, Via Moncalvo 27, 10023, Chieri (TO), nazionalità italiana;

Depositata il: No.:

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda il campo delle misure a coordinate nello spazio tridimensionale (3D) di oggetti di grandi dimensioni (variabili da un metro ad alcune decine di metri).

In particolare, l'invenzione riguarda un dispositivo tastatore per la misura di oggetti di grandi dimensioni che sia capace di fornire con adeguata precisione le coordinate tridimensionali di punti toccati dal tastatore stesso sulla

superficie di un oggetto misurato. L'invenzione riguarda inoltre un procedimento matematico/statistico di localizzazione di un dispositivo tastatore.

La verifica dimensionale e l'assemblaggio di oggetti di grandi dimensioni (ad esempio, fusoliere e ali di velivoli, scafi navali, scocche di mezzi per il trasporto ferroviario o stradale, grandi serbatoi o strutture industriali, moduli aerospaziali, ecc.) sono consuete applicazioni industriali nell'ambito della tecnologia cosiddetta *Large-Volume Metrology* (LVM), con importanti ricadute sulla funzionalità e sicurezza dei prodotti finiti.

Gli strumenti generalmente impiegati per effettuare tali verifiche sono costituiti da sensori in grado di effettuare misurazioni locali di distanze e/o angoli; tali sensori sono generalmente posizionati intorno al volume di misura.

Gli strumenti possono essere classificati in:

- centralizzati: i sensori sono collegati rigidamente tra loro su un'unica unità (ad esempio *laser tracker* o barre fotogrammetriche),
- distribuiti: i sensori sono posizionati liberamente intorno al volume di misura (ad esempio insiemi di teodoliti rotanti automatici a luce laser (R-LAT)).

Sebbene gli strumenti di misura attualmente a disposizione si differenzino in termini di tecnologia e caratteristiche metrologiche, essi hanno diverse caratteristiche comuni:

- utilizzo di *target* da localizzare (ossia dei quali determinare le rispettive coordinate tridimensionali nel volume di misura), generalmente montati su di un tastatore manuale utilizzato da un operatore per misurare i punti d'interesse, o posto a contatto diretto con la superficie dell'oggetto misurato;
- localizzazione dei *target* effettuata utilizzando misurazioni locali dei sensori;

- presenza di una stazione di calcolo (CPU) a cui sono trasmessi i dati relativi alle misure locali effettuate da sensori/*target*, che si occupa della sincronizzazione delle misurazioni locali, dell'elaborazione dei dati e della localizzazione dei *target*.

Per quanto riguarda gli strumenti distribuiti per LVM, i sensori sono posizionati intorno al volume di misura e la localizzazione del target può essere effettuata mediante tre approcci:

- multilaterazione: utilizza le distanze tra *target* e sensori;
- multiangolazione: utilizza gli angoli sottesi dai *target* rispetto ai sensori;
- tecniche ibride: uso combinato di angoli e distanze tra *target* e sensori.

Sebbene diversi strumenti di misura siano (non di rado) a disposizione nello stesso laboratorio/officina industriale, essi sono solitamente impiegati in maniera disgiunta (ad esempio, *laser tracker* utilizzato per alcune tipologie di misurazione, sistema fotogrammetrico per altre, e così via).

Questo approccio ignora i benefici che scaturirebbero dall'uso combinato di molteplici strumenti, come il fatto di superare le limitazioni dei singoli strumenti, ridurre l'incertezza ed estendere il volume di misura, e ridurre l'incidenza degli errori di misura grazie alla cosiddetta "ridondanza di misura".

La letteratura scientifica recente include una procedura innovativa in cui sensori di diversa natura – ossia con diverse caratteristiche metrologiche ed in grado di misurare distanze e/o angoli – di una combinazione di differenti strumenti per LVM condividono le proprie misure locali con l'obiettivo di localizzare uno stesso *target*.

Secondo questa procedura, la combinazione di diversi strumenti può essere vista come un unico “macro-strumento” distribuito, composto da sensori distribuiti di diverse tipologie (per questa ragione, nel seguito del documento l’espressione “sensore distribuito” sarà riferita al generico sensore di un generico strumento per LVM).
Purtroppo, questa procedura presuppone l’esistenza di un *target* “universale”, compatibile con ogni tipologia di sensore (ad esempio un *target* visibile contemporaneamente dai sensori per R-LAT, camere fotogrammetriche, *laser tracker*, etc.), ad oggi non disponibile.
Nonostante ciò, la procedura potrebbe, con opportune modifiche, essere implementata con successo, disponendo di un tastatore dotato di *target* di diversa natura – visibili da almeno una porzione dei sensori in uso – ed una punta a contatto col punto d’interesse che consenta di effettuare la localizzazione del punto stesso in tempo reale.
Il documento US 2008/111985 A1 descrive un dispositivo per il tracciamento e la misurazione di target a sei gradi di libertà basato su una fotocamera.
Il documento US 2002/148133 A1 descrive un artefatto con barra graduata e relativi metodi di utilizzo.
Il documento US 2008/239327 A1 descrive una calibrazione complessiva per una sonda di visione stereo.
Scopo della presente invenzione è dunque quello di proporre un dispositivo tastatore per la misura di oggetti di grandi dimensioni che superi gli svantaggi della tecnica nota e che consenta di effettuare con precisione ed in tempo reale la localizzazione di punti di interesse di un oggetto da misurare.
Ulteriore scopo dell’invenzione è quello di proporre un procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore per effettuare misure di un oggetto di interesse.

Questo ed altri scopi vengono raggiunti con un dispositivo tastatore le cui caratteristiche sono definite nella rivendicazione 1, e con un procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore come definito nella rivendicazione X.
Modi particolari di realizzazione formano oggetto delle rivendicazioni dipendenti, il cui contenuto è da intendersi come parte integrante della presente descrizione.

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione appariranno dalla descrizione dettagliata che segue, effettuata a puro titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:
- la Figura 1 è una vista in prospettiva di un dispositivo tastatore 1 secondo la presente invenzione;
- la Figura 2 è una vista in prospettiva di una pluralità di moduli secondari 8;
- la Figura 3 mostra una vista esplosa (fig. 3a) e una vista assemblata (figura 3b) di un esempio di accoppiamento tra i vari elementi delle figure 1 e 2;
- la Figura 4 mostra uno schema degli angoli e delle distanze misurati da un generico sensore distribuito rispetto ad un *target*; e
- la Figura 5 mostra un esempio di ellissoide d'incertezza relativo ad uno specifico vettore $\boldsymbol{X}$ e matrice Σ_X.

In sintesi, il dispositivo tastatore secondo la presente invenzione è dotato di *target* di diversa natura, visibili da almeno una porzione dei sensori in uso in un sistema LVM, ed è modulare.
Esso presenta inoltre le seguenti funzionalità:
- il numero di *target* montati sul dispositivo tastatore è variabile a seconda dell'applicazione specifica;

- la tipologia dei *target* montati sul dispositivo tastatore (ad esempio, *target* per camere fotogrammetriche, *laser tracker*, R-LAT, etc.) è variabile a seconda dell'applicazione specifica;
- la geometria del dispositivo tastatore, in particolare la posizione dei *target* e della punta, è variabile a seconda dell'applicazione specifica;
- il montaggio/smontaggio dei *target* è rapido e veloce grazie all'uso di moduli dotati di sistemi di accoppiamento/innesto rapido;
- il dispositivo tastatore può inoltre montare sensori integrati (diversi dai sensori distribuiti posti intorno al volume di misura, precedentemente citati) in grado di effettuare misurazioni aggiuntive che concorrono alla localizzazione del dispositivo tastatore stesso (ad esempio inclinometro e bussola, in grado di contribuire alla stima degli angoli di orientamento spaziale del tastatore).

In figura 1 è mostrata una vista in prospettiva di un dispositivo tastatore 1 secondo la presente invenzione.

Esso comprende un modulo primario 2, ossia una barra con un'impugnatura per un operatore, e due estremità 4 con fori calibrati 6 posti in diverse posizioni predefinite e atti rispettivamente ad alloggiare moduli secondari 8 di diverso tipo, come mostrati in figura 2.

In figura 2 è mostrata una vista in prospettiva di una pluralità di moduli secondari 8, in particolare un *target* SMR (*Spherically Mounted Retroreflector*) 8a con l'associata base di montaggio 8a', un *target* R-LAT 8b, un *target* sferico per camera fotogrammetrica 8c, un *target* ultrasonico 8d, prolunghe o estensioni 8e e varie punte 8f. Tali punte 8f sono atte ad essere messe in contatto coi punti d'interesse dell'oggetto da misurare, sono anch'esse

munite di stelo calibrato, innestabile nei fori calibrati 6 del modulo primario 1 o in quelli delle prolunghe 8e.
I *target* 8a-8d e ciascuna delle punte 8f sono atti ad essere inseriti, da soli o tramite una prolunga 8e, in qualsiasi foro calibrato tra quelli alle due estremità 4 del dispositivo tastatore 1.
In figura 3 è mostrata una vista esplosa (figura 3a) e una vista assemblata (figura 3b) di un esempio di accoppiamento tra i vari elementi delle figure 1 e 2, in cui con il *target* sferico 8c è indicato un *target* preferibilmente sferico.
Il *target* 8c è dotato di uno stelo calibrato atto ad essere innestato nei fori calibrati 6 del modulo primario 1 o in quelli delle prolunghe 8e.
Alternativamente, il *target* 8c è sostituito dai *target* 8a, 8b o 8d sopra citati i quali sono provvisti di uno stelo calibrato atto ad essere innestato nei fori calibrati 6 del modulo primario 1 o in quelli delle prolunghe 8e.
Le prolunghe 8e sono di lunghezza variabile e sono atte ad essere poste tra il modulo primario 1 ed i *target* 8a-8d sopra descritti, in modo da variare la posizione relativa tra i *target* 8a-8d ed il modulo primario 2.
Le prolunghe 8e sono dotate di uno stelo calibrato, innestabile nei fori calibrati 6 del modulo primario 1. Esse sono altresì dotate di fori calibrati per “ospitare” qualsiasi altro tipo di modulo secondario (ossia elementi 8a-8e).
Ogni componente è dotato di cablaggio interno per l’alimentazione/comando/trasmissione di dati (quando previsti) e di connettori rapidi agli estremi. Tali connettori consentono un’agevole intercambiabilità dei componenti, allo scopo di personalizzare la configurazione

del dispositivo tastatore 1 per adattarla alle specifiche esigenze di misura.

La localizzazione spaziale del dispositivo tastatore 1 viene effettuata in modo efficace ed efficiente grazie al procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore, che è parte integrante della presente invenzione, descritto in dettaglio qui di seguito, il quale tiene conto dei seguenti fattori:

- posizione relativa tra i *target* di tipo 8a-8d eventualmente montati e la punta 8f montata a bordo del dispositivo tastatore 1. Precisamente, il tastatore 1 viene modellizzato come un corpo rigido con geometria nota (a meno di incertezze sulle posizioni relative tra i *target* montati a bordo dello stesso e la punta 8f);
- incertezza sulla posizione/orientamento dei sensori distribuiti (generalmente posti intorno al volume di misura) coinvolti nella misurazione, che viene determinata mediante processi di taratura di per sé noti, realizzati a monte delle misurazioni stesse;
- incertezza sulle misure (di distanza o angoli) locali dei sensori distribuiti, rispetto ai *target* di tipologia 8a-8d eventualmente montati a bordo del tastatore 1;
- numero, tipologia e posizione relativa (e relative incertezza) dei *target* di tipo 8a-8d a bordo del tastatore 1 rispetto alla punta 8f del tastatore 1 stesso;
- misurazioni angolari (e rispettiva incertezza) fornite dai sensori integrati (inclinometro e bussola) a bordo del tastatore 1.

Si passa ora alla descrizione del procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore secondo la presente invenzione, il quale è basato su diversi passi:

1. definizione di equazioni relative alle distanze/angoli misurati dai sensori distribuiti rispetto ai *target* a bordo del dispositivo tastatore 1;
2. definizione di equazioni relative alle misure angolari dei sensori integrati (inclinometro e bussola) sul tastatore;
3. le suddette equazioni vengono riferite ad un unico sistema di riferimento tridimensionale globale (*OXYZ*);
4. le suddette equazioni vengono linearizzate (ad esempio tramite sviluppo in serie di Taylor troncato al primo ordine) rispetto alle sei incognite del problema, ossia le tre coordinate spaziali della punta 8f montata sul tastatore 1 ed i tre angoli di orientamento del tastatore 1 stesso;

Il problema viene risolto mediante l'approccio *Generalized Least Squares* (GLS), pesando le diverse equazioni sulla base dei rispettivi contributi d'incertezza.

Oltre ad effettuare la localizzazione della punta 8f del tastatore 1, la procedura proposta consente di stimare la relativa incertezza di misura. In dettaglio, la matrice varianza-covarianza relativa alle sei incognite del problema viene determinata applicando la *Multivariate Law of Propagation of Uncertainty* (MLPU) al sistema di equazioni linearizzate precedentemente descritto, con riferimento ai parametri affetti da incertezza.

Verrà ora descritto in dettaglio tale procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore.

Procedimento matematico/statistico per la localizzazione del dispositivo tastatore

Questa sezione introduce il procedimento matematico/statistico per la localizzazione del dispositivo tastatore, che può essere adottato quando si utilizzano (i)

combinazioni di strumenti per LVM composti da sensori distribuiti di diverse tipologie e (ii) un dispositivo tastatore 1 dotato di *target* di diversa natura come sopra descritto.

Caratteristiche principali della procedura

Si considera che ciascun i-esimo strumento per LVM (S_i) comprende un certo numero di sensori; si denomina convenzionalmente il j-esimo sensore di S_i, oppure, per semplicità, il ij-esimo sensore in termini assoluti, come s_{ij} (ad esempio, s_{i1}, s_{i2}, …, s_{ij}, …).

Il dispositivo tastatore 1 comprende un certo numero di *target* di diversa natura e una punta 8f, posta in contatto con punti d'interesse sulla superficie di un oggetto da misurare. Il generico k-esimo *target* montato sul dispositivo tastatore 1 è convenzionalmente denominato T_k.

I sensori distribuiti possono essere classificati in due tipologie:

- sensori di distanza, in grado di misurare le rispettive distanze (d_{ijk}) dal k-esimo *target* (vedere figura 4);
- sensori angolari, in grado di misurare i due angoli azimuth (θ_{ijk}) e elevation (φ_{ijk}) sottesi dal k-esimo *target* (vedere figura 4).

Dalla figura 4 si osserva che per un generico sensore distribuito s_{ij}, il segmento che congiunge il k-esimo target T_k e l'origine o_{ij} del sistema di riferimento cartesiano locale $o_{ij}x_{ij}y_{ij}z_{ij}$ sottende due angoli – θ_{ijk} (azimuth) e φ_{ijk} (elevation) – e una distanza d_{ijk}.

Il pedice "ijk" è riferito alle misurazioni locali (di distanza o angolari) del ij-esimo sensore distribuito rispetto al k-esimo *target* del dispositivo tastatore 1. Si precisa che ogni ij-esimo sensore non è necessariamente

capace di effettuare misurazioni locali rispetto ad ogni *k*-esimo *target* del dispositivo tastatore, per due ragioni:

- affinché la misurazione locale possa essere effettuata, l'intervallo di comunicazione dell'*ij*-esimo sensore deve includere il *k*-esimo *target* e non ci devono essere ostacoli interposti. Ad esempio, l'intervallo di comunicazione di una camera fotogrammetrica di fascia elevata è approssimativamente di 6-8 m.

- pur ammettendo che il *k*-esimo *target* sia incluso nell'intervallo di comunicazione del *ij*-esimo sensore distribuito, le eventuali misurazioni locali possono essere effettuate esclusivamente se i due dispositivi sono compatibili; ad esempio, un *target* per R-LAT non è compatibile con camere fotogrammetriche o laser *tracker*. Inoltre, alcuni sensori distribuiti (quali camere fotogrammetriche, sensori ultrasonici o sensori R-LAT) possono effettuare misurazioni locali rispetto a *target* multipli, mentre altri (come laser *tracker/tracer*) rispetto ad un solo *target* per volta.

Nel caso di compatibilità tra il *ij*-esimo sensore distribuito e il *k*-esimo *target*, si possono definire delle equazioni (linearizzate) relative alle misurazioni locali:

$$\boldsymbol{A}_{ijk}^{dist} \cdot \boldsymbol{X} - \boldsymbol{B}_{ijk}^{dist} = 0 \quad \text{una equazione per sensore di distanza e target} \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{A}_{ijk}^{ang} \cdot \boldsymbol{X} - \boldsymbol{B}_{ijk}^{ang} = 0 \quad \text{due equazioni per sensore angolare e target}$$

dove $\boldsymbol{X} = [X_P,\ Y_P,\ Z_P,\ \omega_P,\ \phi_P,\ \kappa_P]^T$ è il vettore (incognito) contenente le coordinate spaziali (X_P, Y_P, Z_P) del centro della punta del dispositivo tastatore 1 (P) e gli angoli (ω_P, ϕ_P, κ_P) dell'orientamento spaziale del dispositivo stesso, con riferimento ad un sistema di riferimento cartesiano globale *OXYZ*. Le matrici relative ai sensori

distribuiti di distanza sono contrassegnate con l'apice "*dist*", mentre quelle relative ai sensori distribuiti angolari con l'apice "*ang*". Le matrici $\boldsymbol{A}_{ijk}^{dist}$, $\boldsymbol{B}_{ijk}^{dist}$, $\boldsymbol{A}_{ijk}^{ang}$ e $\boldsymbol{B}_{ijk}^{ang}$ contengono:

- i parametri di posizione/orientamento ($X_{0_{ij}}, Y_{0_{ij}}, Z_{0_{ij}}$, ω_{ij}, ϕ_{ij} e κ_{ij}) relativi al ij-esimo sensore distribuito;

- la distanza (d_{ijk}) e/o gli angoli (Θ_{ijk},φ_{ijk}) sottesi dal k-esimo *target*, rispetto al sistema di riferimento cartesiano locale $o_{ij}x_{ij}y_{ij}z_{ij}$ del ij-esimo sensore.

Dato che i valori "veri" dei suddetti parametri non possono essere noti con esattezza, essi sono sostituiti con delle opportune stime: $\hat{X}_{0_{ij}}, \hat{Y}_{0_{ij}}, \hat{Z}_{0_{ij}}$, $\hat{\omega}_{ij}$, $\hat{\phi}_{ij}$ e $\hat{\kappa}_{ij}$, ottenute attraverso processi di taratura iniziali, $\hat{d}_{ijk}$, ottenuta dalle misurazioni locali di distanza, e $\hat{\theta}_{ijk}$ e $\hat{\varphi}_{ijk}$, ottenute dalle misurazioni locali angolari.

Come anticipato, il dispositivo tastatore può montare altresì dei sensori integrati – come inclinometro a due assi o bussola – in grado di effettuare misurazioni angolari per supportare la stima dell'orientamento spaziale del dispositivo tastatore 1, attraverso le seguenti equazioni linearizzate:

$$\boldsymbol{A}^{int} \cdot \boldsymbol{X} - \boldsymbol{B}^{int} = 0 \text{ tre equazioni per i sensori integrati} \quad (2)$$

Le matrici A^{int} e B^{int} contengono le misurazioni locali di tre angoli (ω_I, ϕ_I, κ_I) che rappresentano l'orientamento dei sensori integrati rispetto ad un sistema di riferimento assoluto solidale con la terra ($x_I y_I z_I$).

Il problema della localizzazione del dispositivo tastatore può quindi essere formulato attraverso il seguente modello lineare, che incapsula le relazioni nelle Equazioni 1 e 2:

$$\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{X}-\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}^{dist}\\ \boldsymbol{A}^{ang}\\ \boldsymbol{A}^{int}\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{X}-\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}^{dist}\\ \boldsymbol{B}^{ang}\\ \boldsymbol{B}^{int}\end{bmatrix}=\boldsymbol{0} \qquad (3)$$

dove i blocchi A^{dist}, A^{ang}, B^{dist} e B^{ang} sono definiti come:

$$\boldsymbol{A}^{dist}=\begin{bmatrix}\vdots\\ \boldsymbol{A}_{ijk}^{dist}\\ \vdots\end{bmatrix}_{ijk\in I^{dist}},\quad \boldsymbol{A}^{ang}=\begin{bmatrix}\vdots\\ \boldsymbol{A}_{ijk}^{ang}\\ \vdots\end{bmatrix}_{ijk\in I^{ang}},\quad \boldsymbol{B}^{dist}=\begin{bmatrix}\vdots\\ \boldsymbol{B}_{ijk}^{dist}\\ \vdots\end{bmatrix}_{ijk\in I^{dist}},\quad \boldsymbol{B}^{ang}=\begin{bmatrix}\vdots\\ \boldsymbol{B}_{ijk}^{ang}\\ \vdots\end{bmatrix}_{ijk\in I^{ang}},$$

essendo I^{dist} e I^{ang} le combinazioni di valori (ijk) relativi al ij-esimo sensore di distanza o angolare che comunica con il k–esimo *target*.

I sei parametri incogniti in ***X*** possono essere determinati risolvendo il sistema nell'equazione 3, che è per sua natura sovradefinito, cioè comprende più equazioni che parametri incogniti: uno per ogni combinazione tra ij-esimo sensore distribuito di distanza e il k-esimo *target*, due per ogni combinazione tra il ij-esimo sensore angolare e il k-esimo *target*, e tre per i sensori integrati (tipicamente, due per l'inclinometro a due assi e uno per la bussola).

Le equazioni del sistema possono contribuire diversamente all'incertezza nella localizzazione del dispositivo tastatore. Quattro importanti fattori che influenzano tale incertezza sono:

- incertezza su posizione/orientamento dei sensori distribuiti ($\hat{X}_{0_{ij}}, \hat{Y}_{0_{ij}}, \hat{Z}_{0_{ij}}$, $\hat{\omega}_{ij}$, $\hat{\phi}_{ij}$ e $\hat{\kappa}_{ij}$), ottenute mediante processi di taratura iniziali;
- incertezza sulle misurazioni locali ($\hat{d}_{ijk}$, $\hat{\theta}_{ijk}$ e $\hat{\varphi}_{ijk}$) dei sensori distribuiti rispetto ai *target* del dispositivo

tastatore 1, che dipende dalle rispettive caratteristiche metrologiche;

- posizione relativa tra *P* e i sensori distribuiti; ad esempio, per i sensori angolari, l'incertezza sulla localizzazione di *P* tende ad aumentare proporzionalmente con la distanza tra *P* e i sensori;

- incertezza sulle misurazioni angolari ($\hat{\omega}_I$, $\hat{\phi}_I$ e $\hat{\kappa}_I$) dei sensori integrati del dispositivo tastatore 1, che dipende dalle rispettive caratteristiche metrologiche.

Di conseguenza, occorre risolvere il sistema dell'equazione 3 dando un maggior peso alle equazioni che producono meno incertezza e viceversa.

A tal fine, un approccio è costituito dal metodo *Generalized Least Squares* (GLS), in cui una matrice dei pesi (***W*** che tiene conto dell'incertezza prodotta dalle equazioni) è definita come:

$$\boldsymbol{W} = \left[\boldsymbol{J}^T \cdot \Sigma_\xi \cdot \boldsymbol{J}\right]^{-1} \qquad (4)$$

dove

J è la matrice Jacobiana contenente le derivate parziali degli elementi al primo membro dell'equazione 3 (ossia $\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{X} - \boldsymbol{B}$) rispetto ai parametri contenuti nel vettore ξ: posizione/orientamento dei sensori distribuiti, misurazioni locali dei sensori distribuiti che partecipano alla misura, misurazioni angolari dei sensori integrati, e posizione relativa dei *target* a bordo del dispositivo tastatore rispetto alla punta dello stesso.

Σ_ξ è la matrice di covarianza relativa a ξ, che rappresenta la variabilità dei parametri contenuti in ξ.

I parametri in $\sum_{\xi}$ possono essere determinati in vari modi: (i) da manuali o documentazione tecnica concernente i sensori distribuiti/integrati in uso, (ii) stimati attraverso prove sperimentali *ad hoc*, o (iii) stimati utilizzando dati provenienti da processi di taratura precedenti. Osserviamo che questi parametri dovrebbero riflettere l'incertezza di misura dei sensori in condizioni di lavoro realistiche, ad esempio, in presenza di vibrazioni, variazioni di luce/temperatura e altri tipici fattori di disturbo.

Applicando il metodo GLS al sistema dell'equazione 3, si ottiene la stima finale di $\boldsymbol{X}$ come:

$$\hat{\boldsymbol{X}} = \left(\boldsymbol{A}^T \cdot \boldsymbol{W} \cdot \boldsymbol{A}\right)^{-1} \cdot \boldsymbol{A}^T \cdot \boldsymbol{W} \cdot \boldsymbol{B}. \quad (5)$$

La suddetta procedura di localizzazione del dispositivo tastatore può essere denominata *fusione cooperativa* in quanto aggrega dati ottenuti da sensori con caratteristiche tecniche e metrologiche differenti.

Stima dell'incertezza di misura

Il modello matematico/statistico descritto nella sezione precedente può anche essere utilizzato per stimare l'incertezza nella localizzazione del dispositivo tastatore 1.

Per ogni localizzazione è possibile determinare la matrice di covarianza, applicando la cosiddetta *Multivariate Law of Propagation of Uncertainty* (MLPU) per il sistema di equazioni (linearizzate) dell'equazione 3, con riferimento ai parametri affetti da incertezza contenuti nel vettore $\boldsymbol{\xi}$.

$$\sum_X = \left(\boldsymbol{A}^T \cdot \boldsymbol{W} \cdot \boldsymbol{A}\right)^{-1} \quad (6)$$

La matrice 6x6 risultante, che contiene le varianze (in diagonale) e covarianze (fuori dalla diagonale) relative agli elementi in ***X***, è:

$$\sum_X = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}^2_{X_P} & \hat{\sigma}_{X_P Y_P} & \hat{\sigma}_{X_P Z_P} & \hat{\sigma}_{X_P \omega_P} & \hat{\sigma}_{X_P \phi_P} & \hat{\sigma}_{X_P \kappa_P} \\ \hat{\sigma}_{Y_P X_P} & \hat{\sigma}^2_{Y_P} & \hat{\sigma}_{Y_P Z_P} & \hat{\sigma}_{Y_P \omega_P} & \hat{\sigma}_{Y_P \phi_P} & \hat{\sigma}_{Y_P \kappa_P} \\ \hat{\sigma}_{Z_P X_P} & \hat{\sigma}_{Z_P Y_P} & \hat{\sigma}^2_{Z_P} & \hat{\sigma}_{Z_P \omega_P} & \hat{\sigma}_{Z_P \phi_P} & \hat{\sigma}_{Z_P \kappa_P} \\ \hat{\sigma}_{\omega_P X_P} & \hat{\sigma}_{\omega_P Y_P} & \hat{\sigma}_{\omega_P Z_P} & \hat{\sigma}^2_{\omega_P} & \hat{\sigma}_{\omega_P \phi_P} & \hat{\sigma}_{\omega_P \kappa_P} \\ \hat{\sigma}_{\phi_P X_P} & \hat{\sigma}_{\phi_P Y_P} & \hat{\sigma}_{\phi_P Z_P} & \hat{\sigma}_{\phi_P \omega_P} & \hat{\sigma}^2_{\phi_P} & \hat{\sigma}_{\phi_P \kappa_P} \\ \hat{\sigma}_{\kappa_P X_P} & \hat{\sigma}_{\kappa_P Y_P} & \hat{\sigma}_{\kappa_P Z_P} & \hat{\sigma}_{\kappa_P \omega_P} & \hat{\sigma}_{\kappa_P \phi_P} & \hat{\sigma}^2_{\kappa_P} \end{bmatrix} \qquad (7)$$

La matrice $\boldsymbol{\Sigma_X}$ varia da punto a punto, a seconda della posizione e dell'orientamento del dispositivo tastatore 1, il numero e le caratteristiche metrologiche dei sensori distribuiti/integrati, e i *target* (a bordo del dispositivo tastatore) in uso.
Dal punto di vista pratico, la parte più interessante della matrice è il blocco 3x3 in alto a sinistra, che rappresenta la variabilità nella stima di $\hat{X}_P$, $\hat{Y}_P$ e $\hat{Z}_P$. Il resto della matrice contiene informazioni sulla variabilità nella stima dell'orientamento del dispositivo tastatore (ω_P, ϕ_P e κ_P) e sulle correlazioni tra coordinate spaziali e angoli di orientamento.
Ritornando al blocco 3x3 in alto a sinistra, l'incertezza relativa alle stime di X_P, Y_P, Z_P può essere calcolata considerando gli elementi diagonali del blocco stesso.

$$\begin{aligned} U_{X_P} &= k \cdot \sqrt{\sum_{\boldsymbol{X},11}} = k \cdot \hat{\sigma}_{X_P} \\ U_{Y_P} &= k \cdot \sqrt{\sum_{\boldsymbol{X},22}} = k \cdot \hat{\sigma}_{Y_P} \\ U_{Z_P} &= k \cdot \sqrt{\sum_{\boldsymbol{X},33}} = k \cdot \hat{\sigma}_{Z_P} \end{aligned} \qquad (8)$$

dove k è il fattore di copertura, generalmente impostato come k = 2, il che significa che, ipotizzando una

distribuzione normale delle stime di X_P, Y_P, Z_P, la copertura corrispondente è del 95% circa.
Una stima sintetica dell'incertezza complessiva può essere ottenuta attraverso la somma dei quadrati delle incertezze nell'equazione 8:

$$U_P = \sqrt{U_{X_P}^2 + U_{Y_P}^2 + U_{Z_P}^2} = k \cdot \sqrt{\hat{\sigma}_{X_P}^2 + \hat{\sigma}_{Y_P}^2 + \hat{\sigma}_{Z_P}^2} \qquad (9)$$

Le incertezze relative alle posizioni dei singoli punti possono essere usate per determinare le incertezze relative alle caratteristiche di elementi geometrici più complessi, costruiti utilizzando più punti (ad esempio la distanza tra due punti, il centro o il raggio di una sfera, l'asse di un cilindro, ecc.). A tale proposito, si possono utilizzare le tipiche tecniche di *fitting* della metrologia a coordinate.
Una rappresentazione intuitiva delle incertezze di localizzazione della punta del dispositivo tastatore può essere ottenuta attraverso i cosiddetti *ellissoidi d'incertezza*, la cui costruzione è basata sui seguenti passaggi: (i) diagonalizzazione del blocco 3x3 in alto a sinistra di Σ_X, (ii) determinazione degli assi principali (X', Y', Z'), e (iii) costruzione di un ellissoide 3D con baricentro nel punto X_P, Y_P, Z_P, semiassi orientati lungo X', Y', Z' e proporzionali agli elementi diagonali della matrice diagonalizzata.
La figura 5 mostra un esempio di ellissoide d'incertezza relativo ad uno specifico vettore $\boldsymbol{X}$ e matrice Σ_X.
Naturalmente, fermo restando il principio dell'invenzione, le forme di attuazione ed i particolari di realizzazione potranno essere ampiamente variati rispetto a quanto è stato descritto ed illustrato a puro titolo di esempio non limitativo, senza per questo uscire dall'ambito di

protezione della presente invenzione definito dalle rivendicazioni allegate.

RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo tastatore per la misura di oggetti di grandi dimensioni (1) comprendente:

un modulo primario (2) avente due estremità (4), ciascuna estremità (4) avendo fori calibrati (6);

una pluralità di moduli secondari (8), ciascun modulo secondario essendo uno tra un *target* Spherically Mounted Retroreflector SMR (8a), un *target* Rotary-Laser Automatic Theodolite R-LAT (8b), un *target* sferico per camera fotogrammetrica (8c), un *target* ultrasonico (8d), prolunghe o estensioni (8e) e almeno una punta (8f), in cui tale punta (8f) è atta ad essere messa in contatto con punti d'interesse di un oggetto da misurare,

in cui ciascuno di detti moduli secondari (8) è alloggiato in un rispettivo foro calibrato (6), in cui i *target* (8a, 8b, 8c, 8d) e la punta (8f) sono atti ad essere inseriti, da soli o tramite una prolunga (8e), in qualsiasi foro calibrato (6) tra quelli alle due estremità (4).

2. Dispositivo tastatore secondo la rivendicazione 1, in cui le prolunghe (8e) sono di lunghezza variabile e sono atte ad essere poste tra il modulo primario (1) ed i *target* (8a, 8b, 8c, 8d) in modo da variare la posizione relativa tra i *target* (8a, 8b, 8c, 8d) ed il modulo primario (2).

3. Procedimento di localizzazione di un dispositivo tastatore comprendente le operazioni di:

- predisporre un dispositivo tastatore (1) secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti;
- definire equazioni relative a distanze/angoli misurati da sensori distribuiti attorno al dispositivo tastatore (1) rispetto ai *target* posti a bordo del dispositivo tastatore (1);
- riferire dette equazioni ad un unico sistema di

riferimento tridimensionale globale (*OXYZ*);
- linearizzare dette equazioni rispetto a tre coordinate spaziali della punta (8f) e tre angoli di orientamento del dispositivo tastatore (1);
- risolvere il sistema di equazioni linearizzate mediante l'approccio *Generalized Least Squares* (GLS), pesando le diverse equazioni sulla base di rispettivi contributi d'incertezza.

RIASSUNTO

Dispositivo tastatore per la misura di oggetti di grandi dimensioni (1) comprendente un modulo primario (2) avente due estremità (4) con fori calibrati (6) atti rispettivamente ad alloggiare moduli secondari (8) comprendenti un *target* SMR (8a), un *target* R-LAT (8b), un *target* sferico per camera fotogrammetrica (8c), un *target* ultrasonico (8d), prolunghe o estensioni (8e) e almeno una punta (8f), in cui tale punta (8f) è atta ad essere messa in contatto coi punti d'interesse dell'oggetto da misurare.

Fig. 1

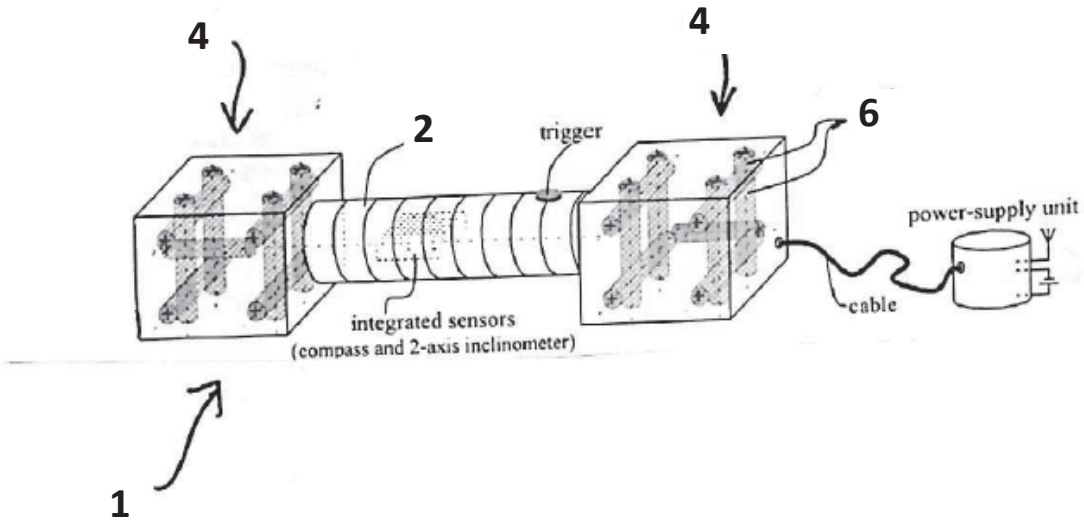

4
4
2
trigger
6
power-supply unit
cable
integrated sensors
(compass and 2-axis inclinometer)
1

Fig. 2

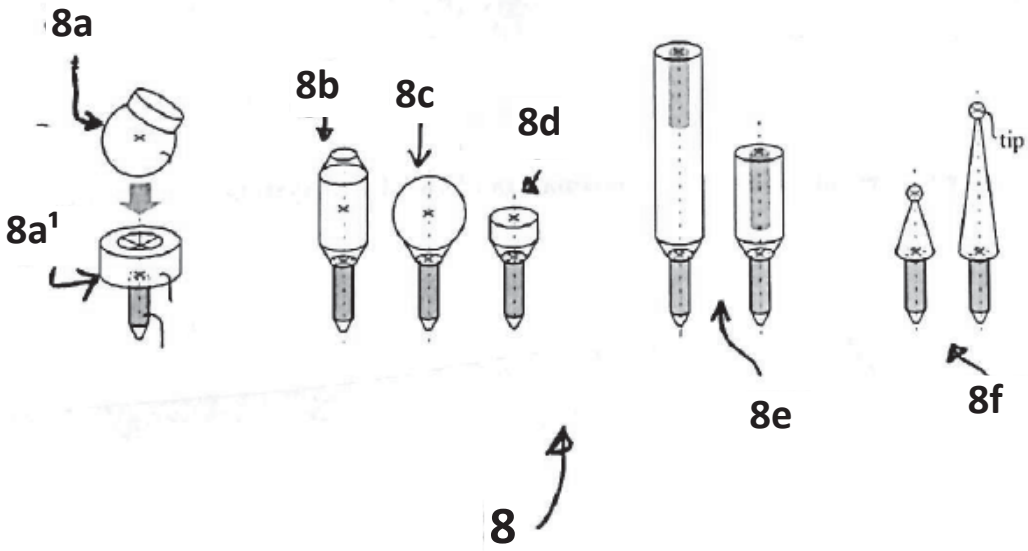

8a
8a¹
8b
8c
8d
tip
8e
8f
8

Fig. 3

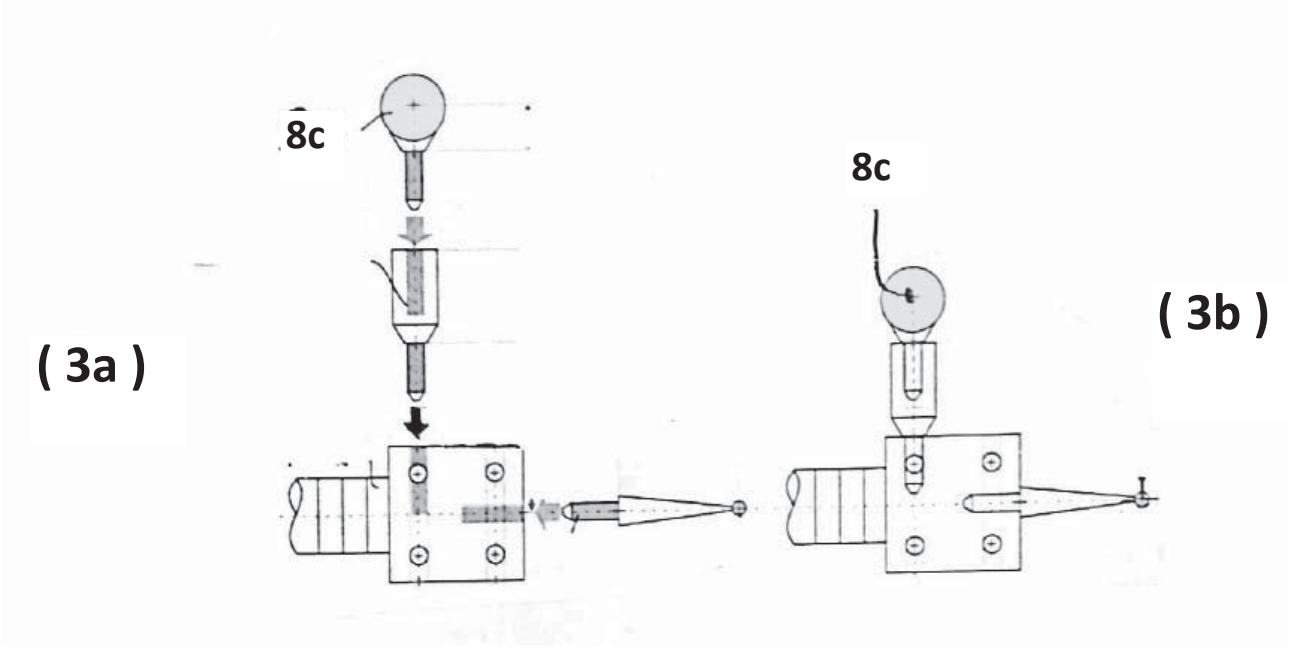

8c
8c
(3a)
(3b)

Fig. 4

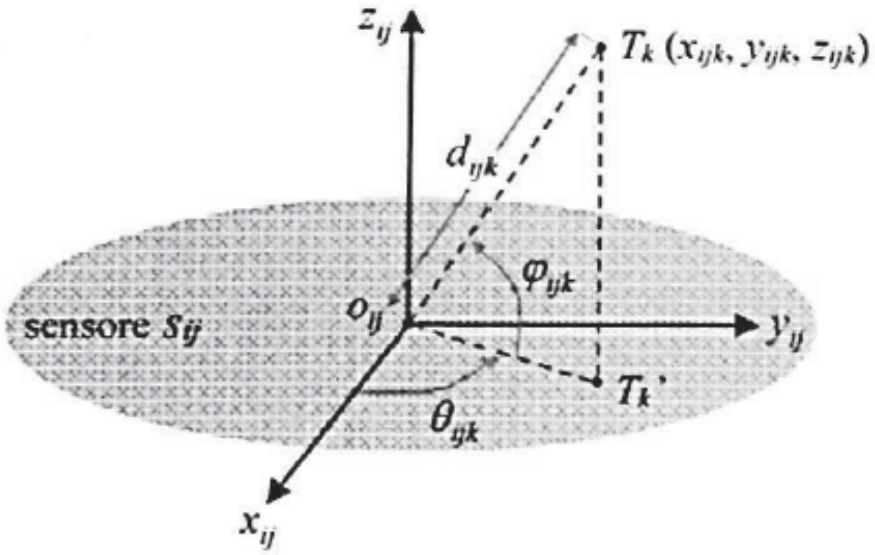
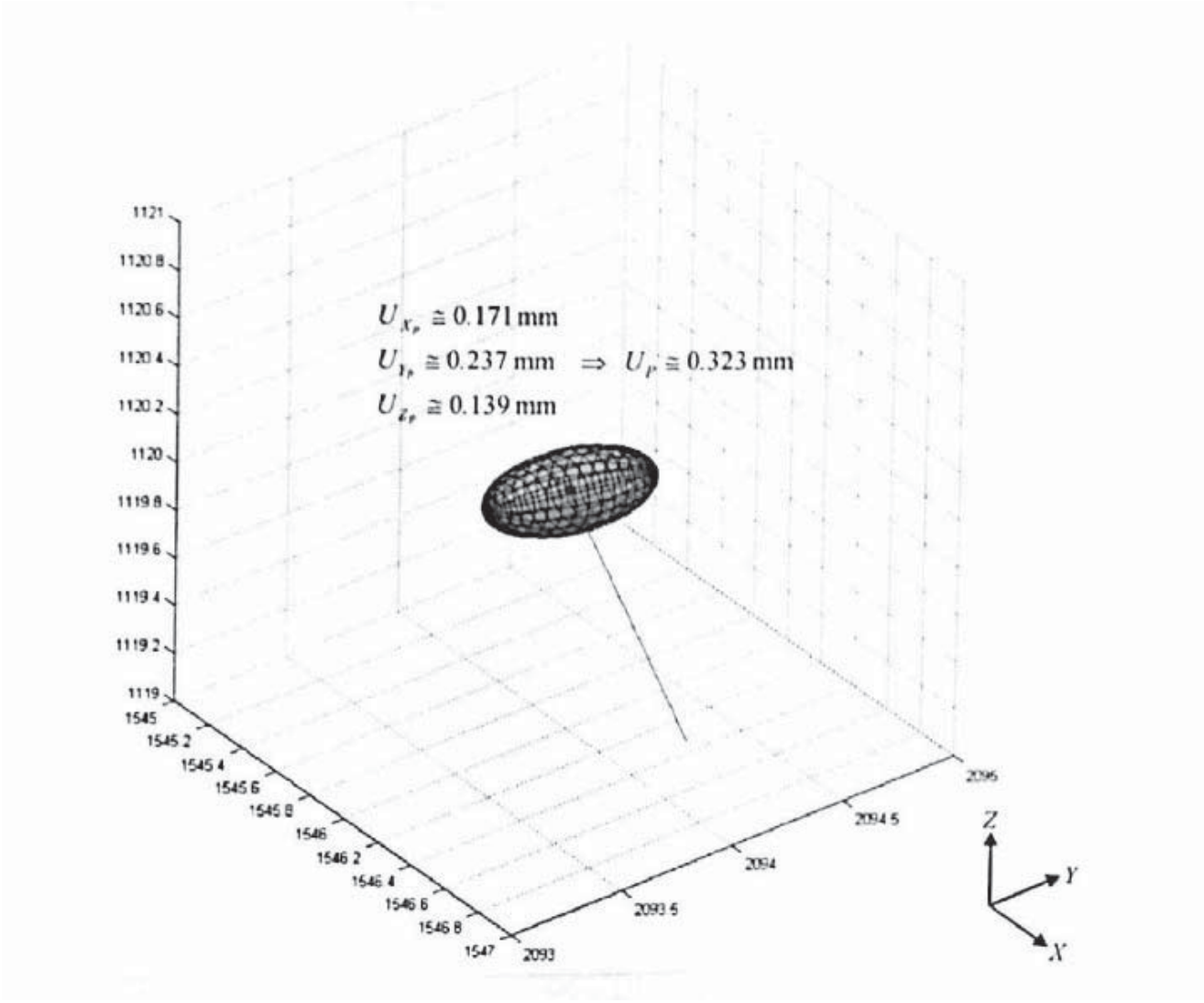

z_{ij}
$T_k\ (x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk})$
d_{ijk}
φ_{ijk}
o_{ij}
sensore Sij
y_{ij}
T_k'
θ_{ijk}
x_{ij}

Fig. 5


$U_{X_P} \cong 0.171\,\text{mm}$
$U_{Y_P} \cong 0.237\,\text{mm} \Rightarrow U_P \cong 0.323\,\text{mm}$
$U_{Z_P} \cong 0.139\,\text{mm}$
1121
1120.8
1120.6
1120.4
1120.2
1120
1119.8
1119.6
1119.4
1119.2
1119
1545
1545.2
1545.4
1545.6
1545.8
1546
1546.2
1546.4
1546.6
1546.8
1547
2093
2093.5
2094
2094.5
2095
Z
Y
X