

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102010901865411A1

Publication Date

20120209

Applicant

SELEX SISTEMI INTEGRATI S.P.A.

Title

TRACCIAMENTO TRIDIMENSIONALE MULTISENORE BASATO SU
TRACCE BIDIMENSIONALI ACQUISITE DA TRACCIATORI DI SENSORI DI
LOCALIZZAZIONE DI BERSAGLI

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"TRACCIAMENTO TRIDIMENSIONALE MULTISENSORE BASATO SU TRACCE
BIDIMENSIONALI ACQUISITE DA TRACCIATORI DI SENSORI DI
LOCALIZZAZIONE DI BERSAGLI"

di SELEX SISTEMI INTEGRATI S.P.A.

di nazionalità italiana

con sede: VIA TIBURTINA, 1231

ROMA (RM)

Inventori: MAZZEI SILVIA, VARGONAITE AUSRA

* * *

SETTORE TECNICO DELL' INVENZIONE

In generale, la presente invenzione è relativa ad un tracciamento tridimensionale multisensore basato su tracce bidimensionali acquisite da tracciatori di sensori di localizzazione di bersagli.

In particolare, la presente invenzione permette di generare una traccia tridimensionale di un bersaglio sulla base di tracce bidimensionali acquisite da tracciatori di sensori di localizzazione di bersagli.

STATO DELL' ARTE

Com'è noto, per sensore di localizzazione di bersagli s'intende un sistema/apparato in grado di rivelare e localizzare bersagli.

In particolare, i sensori di localizzazione di bersagli

si dividono in:

- sensori non cooperativi, i quali sono configurati per rivelare e localizzare bersagli senza alcuna cooperazione attiva da parte dei bersagli; e
- sensori cooperativi, i quali, invece, necessitano di una cooperazione attiva da parte dei bersagli per poterli rivelare e localizzare.

In altre parole, i sensori non cooperativi, per funzionare, ovvero per rivelare e localizzare bersagli, non hanno bisogno di nessuna apparecchiatura speciale a bordo dei bersagli, mentre i sensori cooperativi, per funzionare, necessitano di una specifica apparecchiatura a bordo dei bersagli che sia in grado di cooperare con detti sensori cooperativi.

Esempi di sensori non cooperativi sono i cosiddetti Radar Primari di Sorveglianza ("Primary Surveillance Radars" - PSRs), mentre esempi di sensori cooperativi sono i cosiddetti Radar Secondari di Sorveglianza ("Secondary Surveillance Radars" - SSRs).

Inoltre, un sensore di localizzazione di bersagli è normalmente accoppiato ad un tracciatore configurato per determinare, per ogni bersaglio rivelato, una corrispondente traccia che rappresenta una rispettiva posizione ed una rispettiva velocità del bersaglio rivelato.

Ad esempio, com'è noto, un PSR, tramite un antenna fortemente direttiva, emette impulsi a radiofrequenza e riceve eventuali echi riflessi. Infatti, se un bersaglio viene "colpito" da uno degli impulsi emessi, tale impulso viene riflesso e, quindi, ritorna all'antenna del PSR. Inoltre, un PSR comprende un processore di segnali che, in uso, genera messaggi plot sulla base dei segnali a radiofrequenza ricevuti tramite l'antenna del PSR ed è normalmente accoppiato ad un tracciatore che, sempre in uso, riceve in ingresso i messaggi plot generati da detto processore di segnali e fornisce in uscita una traccia di un bersaglio combinando i messaggi plot in tempi successivi.

Le tracce generate dai tracciatori di sensori di localizzazione di bersagli possono essere bidimensionali o tridimensionali, ovvero possono comprendere posizioni e velocità bidimensionali o tridimensionali dei bersagli rivelati.

In particolare, com'è noto, una traccia bidimensionale di un bersaglio comprende una posizione bidimensionale P del bersaglio espressa in termini di range ρ e azimuth θ ed una velocità bidimensionale V del bersaglio comprendente una componente di range V_ρ ed una componente di azimuth V_θ . Quindi, in una traccia bidimensionale mancano la quota del bersaglio ϕ e la componente in elevazione V_ϕ della velocità

del bersaglio.

Di seguito, per semplicità di descrizione, i sensori di localizzazione di bersagli i cui tracciatori determinano tracce bidimensionali verranno chiamati sensori di localizzazione di bersagli 2D.

Attualmente i sensori di localizzazione di bersagli 2D, in particolare non cooperativi, sono largamente impiegati in sistemi di sorveglianza marittima, aerea e terrestre, ad esempio per la sorveglianza costiera o in ambito aeroportuale.

Per questo motivo la Richiedente ha condotto uno studio molto approfondito volto ad indagare la possibilità di sviluppare una metodologia per generare una traccia tridimensionale di un bersaglio sulla base di tracce bidimensionali acquisite da tracciatori di sensori di localizzazione di bersagli 2D.

OGGETTO E RIASSUNTO DELL'INVENZIONE

Scopo della presente invenzione, quindi, è quello di fornire un metodo per generare una traccia tridimensionale di un bersaglio sulla base di tracce bidimensionali acquisite da tracciatori di sensori di localizzazione di bersagli 2D.

Il suddetto scopo è raggiunto dalla presente invenzione in quanto essa è relativa ad un metodo di tracciamento tridimensionale multisensore e ad un sistema, un

elaboratore elettronico ed un programma informatico configurati per implementare detto metodo di tracciamento tridimensionale multisensore, secondo quanto definito nelle rivendicazioni annesse.

In particolare, la presente invenzione è relativa ad un metodo di tracciamento tridimensionale multisensore comprendente:

- acquisire una prima traccia bidimensionale di un primo bersaglio ad un dato tempo generata da un primo tracciatore di un primo sensore di localizzazione di bersagli avente una prima area di copertura;

- acquisire una seconda traccia bidimensionale di un secondo bersaglio al dato tempo generata da un secondo tracciatore di un secondo sensore di localizzazione di bersagli avente una seconda area di copertura che si sovrappone parzialmente alla prima area di copertura in una regione di copertura condivisa da detti sensori di localizzazione di bersagli, il primo sensore di localizzazione di bersagli ed il secondo sensore di localizzazione di bersagli essendo mutuamente distanziati di una data distanza;

- eseguire un test di correlazione sulla base della prima traccia bidimensionale, della seconda traccia bidimensionale e della data distanza per verificare se il primo bersaglio ed il secondo bersaglio rappresentano uno

stesso unico bersaglio ("same single target") presente nella regione di copertura condivisa; e,

- se il primo bersaglio ed il secondo bersaglio rappresentano uno stesso unico bersaglio presente nella regione di copertura condivisa, generare una traccia tridimensionale di detto stesso unico bersaglio al dato tempo.

Preferibilmente, la prima traccia bidimensionale comprende un primo vettore bidimensionale che rappresenta una prima posizione bidimensionale del primo bersaglio al dato tempo in un primo sistema di riferimento bidimensionale relativo del primo sensore di localizzazione di bersagli e la seconda traccia bidimensionale comprende un secondo vettore bidimensionale che rappresenta una seconda posizione bidimensionale del secondo bersaglio al dato tempo in un secondo sistema di riferimento bidimensionale relativo del secondo sensore di localizzazione di bersagli.

Inoltre, sempre preferibilmente, eseguire un test di correlazione comprende:

- verificare se il primo vettore bidimensionale ed il secondo vettore bidimensionale soddisfano una prima condizione in un dato sistema di riferimento tridimensionale;

- se il primo vettore bidimensionale ed il secondo

vettore bidimensionale soddisfano la prima condizione nel dato sistema di riferimento tridimensionale, verificare se il primo vettore bidimensionale, il secondo vettore bidimensionale e la data distanza soddisfano una seconda condizione;

- se il primo vettore bidimensionale, il secondo vettore bidimensionale e la data distanza soddisfano la seconda condizione, verificare se, sulla base del primo vettore bidimensionale e del secondo vettore bidimensionale, una stessa quota viene determinata per il primo bersaglio ed il secondo bersaglio nel dato sistema di riferimento tridimensionale; e

- se, sulla base del primo vettore bidimensionale e del secondo vettore bidimensionale, una stessa quota viene determinata per il primo bersaglio ed il secondo bersaglio nel dato sistema di riferimento tridimensionale, rivelare che il primo bersaglio ed il secondo bersaglio rappresentano uno stesso unico bersaglio presente nella regione di copertura condivisa.

Infine, sempre preferibilmente, generare una traccia tridimensionale di detto stesso unico bersaglio al dato tempo comprende:

- generare una traccia tridimensionale di detto stesso unico bersaglio al dato tempo comprendente una posizione tridimensionale di detto stesso unico bersaglio

al dato tempo nel dato sistema di riferimento tridimensionale, detta posizione tridimensionale comprendendo la stessa quota determinata per il primo bersaglio ed il secondo bersaglio nel dato sistema di riferimento tridimensionale.

BREVE DESCRIZIONE DEI DISEGNI

Per una migliore comprensione della presente invenzione, alcune forme preferite di realizzazione, fornite a puro titolo di esempio esplicativo e non limitativo, verranno ora illustrate con riferimento ai disegni annessi (non in scala), in cui:

- la Figura 1 illustra schematicamente un sistema di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione;
- la Figura 2 illustra schematicamente errori di misura di un radar primario di sorveglianza;
- la Figura 3 illustra schematicamente due radar primari di sorveglianza e rispettive aree di copertura;
- la Figura 4 illustra schematicamente un sistema di riferimento assoluto usato in un primo scenario operativo per eseguire un test di correlazione di due tracce bidimensionali secondo una preferita forma di realizzazione della presente invenzione;
- la Figura 5 illustra schematicamente un piano cartesiano di riferimento usato in un secondo scenario

operativo per eseguire detto test di correlazione di due tracce bidimensionali secondo detta preferita forma di realizzazione della presente invenzione; e

- la Figura 6 illustra schematicamente un sensore di localizzazione di bersagli posizionato sulla superficie della Terra che rivela un bersaglio posizionato ad una data distanza dalla superficie della Terra.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DI FORME PREFERITE DI REALIZZAZIONE DELL' INVENZIONE

La presente invenzione verrà ora descritta in dettaglio con riferimento alle figure allegate per permettere ad una persona esperta di realizzarla ed utilizzarla. Varie modifiche alle forme di realizzazione descritte saranno immediatamente evidenti alle persone esperte ed i generici principi descritti possono essere applicati ad altre forme di realizzazione ed applicazioni senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate. Pertanto, la presente invenzione non deve essere considerata limitata alle forme di realizzazione descritte ed illustrate, ma gli si deve accordare il più ampio ambito protettivo conforme ai principi e alle caratteristiche qui descritte e rivendicate.

Inoltre, la presente invenzione è attuata per mezzo di un programma informatico comprendente porzioni di codice

atte ad implementare, quando il programma informatico è caricato nella memoria di un elaboratore elettronico ed eseguito da detto elaboratore elettronico, il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione descritto di seguito.

In figura 1 viene mostrato uno schema a blocchi che rappresenta un sistema di tracciamento tridimensionale multisensore 1 secondo la presente invenzione.

In particolare, come mostrato nella figura 1, il sistema di tracciamento tridimensionale multisensore 1 comprende N sensori di localizzazione di bersagli 2D 2, dove N è numero intero maggiore di, o uguale a due, ovvero $N \geq 2$, ciascuno dei quali è accoppiato ad un rispettivo tracciatore 3 per fornirgli rispettivi dati. Ogni tracciatore 3 è, quindi, configurato per determinare tracce bidimensionali (2D) di bersagli sulla base dei dati ricevuti dal rispettivo sensore di localizzazione di bersagli 2D 2 a cui è accoppiato.

Ad esempio, gli N sensori di localizzazione di bersagli 2D 2 possono convenientemente essere Radar Primari di Sorveglianza (PSRs) ciascuno dei quali, in uso, fornisce al rispettivo tracciatore 3 rispettivi messaggi plot generati da un rispettivo processore di segnali sulla base dei segnali a radiofrequenza ricevuti dalla rispettiva antenna. In uso, ogni tracciatore 3 genera rispettive tracce

bidimensionali ($2D$) di bersagli sulla base dei messaggi plot ricevuti.

In dettaglio, ogni traccia bidimensionale ($2D$) generata dai tracciatori 3 comprende, come detto precedentemente, una posizione bidimensionale P del bersaglio in coordinate slant, ovvero espressa in termini di range ρ e azimuth θ , ed una velocità bidimensionale V del bersaglio comprendente una componente di range V_ρ ed una componente di azimuth V_θ .

Inoltre, sempre come mostrato nella figura 1, il sistema di tracciamento tridimensionale multisensore 1 comprende anche un elaboratore elettronico 4, ad esempio un computer, accoppiato agli N tracciatori 3 per acquisire da questi le rispettive tracce bidimensionali ($2D$) generate e configurato per generare tracce tridimensionali ($3D$) di bersagli sulla base delle tracce bidimensionali ($2D$) acquisite in accordo con il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione.

Sulla base di quanto finora descritto e mostrato nella figura 1, il sistema di tracciamento tridimensionale multisensore 1 ha un'architettura distribuita in cui il tracciamento tridimensionale multisensore avviene a livello di centro di calcolo.

Di seguito, per semplicità di descrizione e senza perdere in generalità, il metodo secondo la presente

invenzione verrà descritto facendo riferimento a due soli sensori di localizzazione di bersagli $2D$ (ovvero con $N=2$). Rimane, in ogni caso, sottointeso che il metodo secondo la presente invenzione è applicabile a tracce bidimensionali ($2D$) acquisite dai tracciatori di un qualsiasi numero N di sensori di localizzazione di bersagli $2D$, con $N \geq 2$, sia cooperativi che non cooperativi.

Pertanto, al fine di descrivere in dettaglio la presente invenzione, si prendano in considerazione un primo sensore di localizzazione di bersagli $2D$, di seguito chiamato, per semplicità di descrizione, sensore A , ed un secondo sensore di localizzazione di bersagli $2D$, di seguito chiamato, sempre per semplicità di descrizione, sensore B , i quali sono posizionati in modo tale da avere una regione di copertura condivisa nella quale vengono rivelati uno o più bersagli per ognuno dei quali il tracciatore del sensore A genera una rispettiva prima traccia bidimensionale ($2D$) ed il tracciatore del sensore B genera una rispettiva seconda traccia bidimensionale ($2D$). In accordo con il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione sulle prime e sulle seconde tracce bidimensionali ($2D$) viene eseguito un test di correlazione basato su un calcolo della quota dei bersagli per verificare se e quali tracce bidimensionali appartengano a stessi bersagli reali e contestualmente per

calcolarne le rispettive quote.

In altre parole, sulla base dei dati cinematici generati dai tracciatori di almeno due sensori di localizzazione di bersagli $2D$ aventi una regione di copertura condivisa, secondo la presente invenzione è possibile correlare le tracce bidimensionali ($2D$) appartenenti ad uno stesso bersaglio presente in detta regione di copertura condivisa in modo tale da calcolarne anche la rispettiva quota e, preferibilmente, anche la componente in elevazione della rispettiva velocità.

In particolare, il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione permette di determinare una traccia fusa tridimensionale ($3D$) in cui la cinematica, ovvero la posizione e la velocità, di un bersaglio presente nella regione di copertura condivisa da almeno due sensori di localizzazione di bersagli $2D$ è arricchita dalla terza dimensione ed è calcolata tenendo conto delle cinematiche delle tracce bidimensionali ($2D$) acquisite dai tracciatori di detti sensori di localizzazione di bersagli $2D$, permettendo, in questo modo, di migliorare la correlazione, la predizione e l'identificazione della categoria (ad esempio di superficie o aerea) della traccia fusa tridimensionale ($3D$).

Pertanto, a differenza dei sistemi di localizzazione attualmente noti, il metodo di tracciamento tridimensionale

multisensore secondo la presente invenzione consente di individuare un bersaglio con cinematica 3D come risultato di una fusione di una coppia di tracce 2D slant provenienti da tracciatori di sensori di localizzazione di bersagli 2D.

Tornando, quindi, alla descrizione dettagliata della presente invenzione, i sensori *A* e *B* possono essere posizionati entrambi a terra, anche a diverse quote, oppure uno di detti sensori può essere installato su un mezzo in movimento con un moto considerabile inerziale a meno di opportune correzioni (cioè approssimabile a un moto rettilineo uniforme nell'intervallo di tempo significativo per la misura 2D, ad esempio, nel caso di sensore radar, il periodo di scansione *T*, tipicamente da 1 a 10 secondi, con cui l'apparato monitora e invia i dati), ad esempio una nave o un satellite, mentre l'altro è posizionato a terra, oppure detti sensori possono essere installati entrambi su mezzi in movimento, ad esempio navi o satelliti. Infatti, l'applicazione del metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione è possibile anche quando uno o più sensori di localizzazione di bersagli 2D sono installati su rispettivi mezzi in movimento perché, se è nota la cinematica del/i mezzo/i in movimento, la cinematica delle tracce bidimensionali (2D) può sempre essere corretta sulla base dei dati di beccheggio ("pitch"), rollio ("roll") ed imbardata ("yaw")

del/i mezzo/i in movimento.

Nel caso di un mezzo con moto non completamente prevedibile come quello della nave valgono le osservazioni di sistema approssimativamente inerziale nel caso di un moto di un mezzo robotizzato (satellite o mezzi su traiettorie pre-impostate con algoritmi noti) di cui si conosca perfettamente la traiettoria nel tempo e nello spazio a ogni istante cioè con equazioni del moto note.

Pertanto, per un mezzo con moto vario, è sempre possibile apportare le dovute correzioni alla cinematica di un bersaglio visto da un sensore di localizzazione di bersagli installato su detto mezzo.

Preferibilmente, i sensori A e B sono posizionati in maniera tale che la loro mutua distanza D sia uguale a, o maggiore di un errore lineare massimo di misura Err_{MAX} di detti sensori, ovvero, usando un formalismo matematico, risulta che la distanza D tra i sensori A e B soddisfa il seguente primo vincolo matematico:

$$Err_{MAX} \leq D. \quad (1)$$

In particolare, se Err_{A-MAX} è l'errore lineare massimo di misura del sensore A ed Err_{B-MAX} è l'errore lineare massimo di misura del sensore B , allora risulta che Err_{MAX} è uguale al maggiore tra Err_{A-MAX} e Err_{B-MAX} , ovvero, usando un formalismo matematico, risulta che

$$Err_{MAX} = \max[Err_{A-MAX}, Err_{B-MAX}]$$

Com'è noto, la forma dell'errore di misura di un apparato di misura dipende dalla natura del dato misurato. Ad esempio, nel caso di un PSR, il modo di "vedere" lo spazio non è isomorfo ma deformato polarmente. In altre parole, un PSR, generalmente, presenta, per le misure di range, un errore di misura in range $\delta\rho$ costante e, per le misure di azimuth, un errore di misura in azimuth $2\sigma_\theta$ costante i quali, però, danno origine ad un errore di misura totale che, per un bersaglio "visto" dal PSR sotto uno stesso angolo di azimuth pari all'errore di misura in azimuth $2\sigma_\theta$, varia al variare della distanza dal PSR di detto bersaglio.

In particolare, in un PSR, l'errore di misura totale è più grande in ampiezza quanto più è lontano dal centro del PSR il bersaglio da localizzare.

Per una migliore comprensione dell'errore lineare massimo di misura di un PSR, in figura 2 viene mostrato schematicamente come varia, in un piano di riferimento, l'errore di misura totale di un PSR 5, avente un errore di misura in range $\delta\rho$ costante ed un errore di misura in azimuth $2\sigma_\theta$ costante, al variare della distanza dal PSR 5 di un bersaglio 6 "visto" dal PSR 5 nel piano di riferimento sotto uno stesso angolo di azimuth uguale all'errore di misura in azimuth $2\sigma_\theta$, ovvero "visto" dal PSR 5 nel piano di riferimento in un settore circolare

individuato da un angolo che è uguale all'errore di misura in azimuth $2\sigma_\theta$ e che ha come vertice il PSR 5, detto piano di riferimento essendo perpendicolare all'asse di rotazione (non mostrato in figura 2) del PSR 5.

In particolare, la figura 2 mostra, per ogni distanza del bersaglio 6 dal PSR 5, un rispettivo errore di misura totale che è rappresentato da una rispettiva porzione di detto settore circolare indicata con, rispettivamente, 7, 8, 9 e 10.

Pertanto, se il sensore A è un PSR che ha un errore di misura in azimuth $2\sigma_{\theta A}$ ed una copertura massima C_{A-MAX} , allora l'errore lineare massimo di misura Err_{A-MAX} del PSR A è uguale all'errore angolare rettificato alla distanza di copertura massima C_{A-MAX} , ovvero è uguale a $2\sigma_{\theta A}C_{A-MAX}$. Analogamente, se il sensore B è un PSR che ha un errore di misura in azimuth $2\sigma_{\theta B}$ ed una copertura massima C_{B-MAX} , allora l'errore lineare massimo di misura Err_{B-MAX} del PSR B è uguale all'errore angolare rettificato alla distanza di copertura massima C_{B-MAX} , ovvero è uguale a $2\sigma_{\theta B}C_{B-MAX}$.

Pertanto, sulla base di quanto precedentemente descritto, assumendo che

$$Err_{MAX} = 2\tilde{\sigma}_\theta \tilde{C}_{MAX} = \max[Err_{A-MAX}, Err_{B-MAX}],$$

i PSRs A e B sono, preferibilmente, posizionati in maniera tale che la loro mutua distanza D soddisfi il seguente secondo vincolo matematico:

$$2\tilde{\sigma}_{\theta}\tilde{C}_{MAX} \leq D \quad (2)$$

in cui $2\tilde{\sigma}_{\theta}$ denota l'errore di misura in azimuth del PSR avente l'errore lineare massimo di misura tra i PSRs A e B e $\tilde{C}_{MAX}$ denota la copertura massima del PSR avente l'errore lineare massimo di misura tra i PSRs A e B.

Ad esempio, se $\tilde{C}_{MAX}$ è uguale a 100 Km e $2\tilde{\sigma}_{\theta}$ è uguale a 0.005 rad , ovvero circa 0.3° , allora risulta che la distanza D tra i PSRs A e B è uguale a, o maggiore di 1 Km .

A tal riguardo, in figura 3 vengono mostrati schematicamente, in un piano di riferimento, un primo PSR 11 avente un primo errore di misura in azimuth $2\sigma_{\theta 11}$ ed una prima copertura massima C_{11} ed un secondo PSR 12 avente un secondo errore di misura in azimuth $2\sigma_{\theta 12}$ ed una seconda copertura massima C_{12} , i quali sono distanziati di una distanza D tale da soddisfare il secondo vincolo matematico (2), detto piano di riferimento essendo perpendicolare agli assi di rotazione (non mostrati in figura 3) del primo PSR 11 e del secondo PSR 12 i quali, nell'esempio mostrato in figura 3, sono ipotizzati tra loro paralleli. Inoltre, in figura 3 viene indicata con D' la proiezione in detto piano di riferimento della distanza D tra il primo PSR 11 ed il secondo PSR 12.

In particolare, in figura 3 vengono mostrati un primo cerchio 13 che ha come centro il primo PSR 11 e come raggio la prima copertura massima C_{11} e che rappresenta, quindi,

l'area di copertura del primo PSR 11 in detto piano di riferimento, ed un secondo cerchio 14 che ha come centro il secondo PSR 12 e come raggio la seconda copertura massima C_{12} e che, quindi, rappresenta l'area di copertura del secondo PSR 12 in detto piano di riferimento. Inoltre, sempre come mostrato nella figura 3, il primo cerchio 13 ed il secondo cerchio 14 presentano un'intersezione 15 che rappresenta una regione di copertura condivisa dai PSRS 11 e 12 in detto piano di riferimento.

Andando, ora, più nel dettaglio dei vincoli matematici (1) e (2), essi dipendono dalla capacità dei due sensori A e B di distinguere due oggetti reali. Pertanto, i sensori A e B si possono ritenere non omocentrici e non co-locati se ciascun sensore ed un oggetto reale da tracciare possono essere "visti" in posizioni distinte dall'altro sensore.

In particolare, nei vincoli matematici (1) e (2) viene preso in considerazione l'errore lineare massimo di misura Err_{MAX} in modo tale da garantire sempre la possibilità di eseguire una triangolazione per determinare una traccia tridimensionale di un bersaglio intercettato dai sensori A e B , indipendentemente dalla posizione di detto bersaglio nella regione di copertura condivisa da detti sensori A e B .

In altra parole, se è verificato il primo vincolo matematico (1) (o, analogamente, nel caso di due PSRs, il

secondo vincolo matematico (2)), il bersaglio ed i centri dei sensori A e B formano, nei limiti dell'errore lineare massimo di misura Err_{MAX} , i tre vertici distinguibili di un triangolo.

Se, invece, non è verificato il primo vincolo matematico (1) (o, analogamente, nel caso di due PSRs, il secondo vincolo matematico (2)), il triangolo degenera in due rette parallele coincidenti nei limiti dell'errore lineare massimo di misura Err_{MAX} e, quindi, la triangolazione non può essere applicata. In altre parole, se non è verificato il primo vincolo matematico (1) (o, analogamente, nel caso di due PSRs, il secondo vincolo matematico (2)), un bersaglio viene "visto" dai sensori A e B sotto la stessa prospettiva.

Andando, ora, più nel dettaglio della presente invenzione, si assume che:

- $ST_A(\rho_A, \theta_A; V_{\rho A}, V_{\theta A})$ è una prima traccia 2D slant di un primo bersaglio ad un tempo t in un primo sistema di riferimento relativo del sensore A generata dal tracciatore accoppiato al sensore A ; ed
- $ST_B(\rho_B, \theta_B; V_{\rho B}, V_{\theta B})$ è una seconda traccia 2D slant di un secondo bersaglio al tempo t (ovvero allo stesso tempo t della prima traccia 2D slant ST_A) in un secondo sistema di riferimento relativo del sensore B generata dal tracciatore accoppiato al sensore B .

Quindi, secondo una preferita forma di realizzazione della presente invenzione, viene eseguito un test di correlazione sulle tracce ST_A e ST_B , che sono relative allo stesso tempo t , per verificare se sono relative ad uno stesso unico bersaglio. Inoltre, se le tracce ST_A e ST_B sono relative ad uno stesso unico bersaglio, la presente invenzione consente di calcolare, contestualmente all'esecuzione di detto test di correlazione, anche la quota di detto bersaglio.

In particolare, il test di correlazione è verificato dalle tracce ST_A e ST_B se sono verificate le seguenti tre condizioni:

1. i vettori posizione delle tracce ST_A e ST_B , se proiettati su un piano di riferimento, si intersecano (condizione sulla direzione dei vettori posizione delle tracce);

2. i moduli dei vettori posizione delle tracce ST_A e ST_B e la distanza D tra i centri dei sensori A e B soddisfano la disuguaglianza triangolare (condizione sui moduli dei vettori posizione delle tracce), la quale, usando un formalismo matematico, è espressa dalla seguente disuguaglianza matematica:

$$\|\bar{P}_A\| + \|\bar{P}_B\| \geq D \pm \delta p \quad (3)$$

in cui $\bar{P}_A$ è il vettore posizione contenuto nella prima traccia $2D$ slant ST_A , $\bar{P}_B$ è il vettore posizione contenuto

nella seconda traccia 2D slant ST_B e $\delta p = \delta p_A + \delta p_B$, dove δp_A è l'errore di misura in range del sensore A e δp_B è l'errore di misura in range del sensore B; e

3. le tracce ST_A e ST_B consentono di determinare una stessa quota per il primo bersaglio e per il secondo bersaglio (condizione sulla quota).

Se tutte e tre le precedenti condizioni sono verificate dalle tracce ST_A e ST_B , allora il test di correlazione è verificato e, quindi, le tracce ST_A e ST_B sono relative ad uno stesso unico bersaglio per il quale viene anche generata una traccia 3D $MST(\rho, \theta, \varphi; V_\rho, V_\theta, V_\varphi)$ al tempo t in un sistema di riferimento assoluto O .

In figura 4 viene mostrato schematicamente un sistema di riferimento assoluto O usato per eseguire il test di correlazione delle tracce ST_A e ST_B secondo una preferita forma di realizzazione della presente invenzione.

In particolare, come mostrato in figura 4, il sistema di riferimento assoluto O è un sistema di coordinate cartesiane tridimensionali zxy .

In dettaglio, la figura 4 mostra:

- un punto O_A che rappresenta il centro del sensore A e di cui sono note le coordinate (X_A, Y_A, Z_A) nel sistema di riferimento assoluto O ;
- un punto O_B che rappresenta il centro del sensore B e di cui sono note le coordinate (X_B, Y_B, Z_B) nel sistema di

referimento assoluto O ;

- una retta r che
 - rappresenta una retta di intersezione fra i piani di rotazione (non mostrati in figura 4) dei sensori A e B passanti per i vettori posizione delle tracce ST_A e ST_B ,
 - individua una direzione verticale alla superficie della Terra, e
 - passa per un punto T che, nel caso in cui le tracce ST_A e ST_B soddisfino il test di correlazione, rappresenta il primo bersaglio visto dal sensore A ed il secondo bersaglio visto dal sensore B , è ad una distanza ρ_A (range del primo bersaglio nella prima traccia 2D slant ST_A) dal sensore A e ad una distanza ρ_B (range del secondo bersaglio nella seconda traccia 2D slant ST_B) dal sensore B ed ha coordinate (x_0, y_0, h_0) nel sistema di riferimento assoluto O ; l'asse $\hat{z}$ del sistema di riferimento assoluto O essendo parallelo alla retta r ;
- un piano orizzontale di riferimento PO che è perpendicolare alla retta r e, quindi, anche all'asse $\hat{z}$ del sistema di riferimento assoluto O e che, per convenzione, è posizionato in $z=0$;

- un punto P_0 che ha coordinate $(x_0, y_0, 0)$ nel sistema di riferimento assoluto O e che rappresenta l'intersezione sul piano orizzontale di riferimento PO dei vettori posizione contenuti nelle tracce ST_A e ST_B proiettati su detto piano orizzontale di riferimento PO ; in figura 4 le proiezioni sul piano orizzontale di riferimento PO dei vettori posizione contenuti nelle tracce ST_A e ST_B essendo indicate con, rispettivamente, R_A e R_B ; e

- la distanza D tra i sensori A e B avente una proiezione d nel piano orizzontale di riferimento PO .

Inoltre, si assume che:

- (x_A, y_A) sono le coordinate cartesiane slant del primo bersaglio nel primo sistema di riferimento relativo del sensore A , le quali sono calcolate sulla base del range ρ_A e dell'azimuth θ_A contenuti nella prima traccia 2D slant ST_A ;

- (x_B, y_B) sono le coordinate cartesiane slant del secondo bersaglio nel secondo sistema di riferimento relativo del sensore B , le quali sono calcolate sulla base del range ρ_B e dell'azimuth θ_B contenuti nella seconda traccia 2D slant ST_B ;

- (x_A^O, y_A^O) sono le coordinate cartesiane slant del primo bersaglio nel sistema di riferimento assoluto O , le quali sono calcolate mediante la seguente traslazione di coordinate

$$x_A^O = x_A + X_A$$

$$y_A^O = y_A + Y_A;$$

e

• (x_B^O, y_B^O) sono le coordinate cartesiane slant del secondo bersaglio nel sistema di riferimento assoluto O le quali sono calcolate mediante la seguente traslazione di coordinate

$$x_B^O = x_B + X_B$$

$$y_B^O = y_B + Y_B.$$

Facendo sempre riferimento a quanto finora descritto e a quanto mostrato in figura 4, per quanto riguarda la condizione sulla direzione dei vettori posizione delle tracce, i vettori posizione $2D$ contenuti nelle tracce ST_A e ST_B , per essere relativi ad uno stesso unico bersaglio, devono avere un'intersezione non nulla (ovvero $P_0(x_0, y_0, 0)$) se proiettati sul piano orizzontale di riferimento PO .

Quindi, al fine di verificare se detta condizione sulla direzione dei vettori posizione delle tracce è soddisfatta o meno, si cerca di determinare le coordinate cartesiane (x_0, y_0) del punto d'intersezione P_0 dei vettori posizione delle tracce ST_A e ST_B proiettati sul piano orizzontale di riferimento PO risolvendo il seguente sistema lineare di due equazioni in due incognite:

$$\begin{cases} x_0 - x_A^O = m_A^O(y_0 - y_A^O) \\ x_0 - x_B^O = m_B^O(y_0 - y_B^O) \end{cases}$$

con

$$m_A^O = \frac{x_A^O - X_A}{y_A^O - Y_A}$$

e

$$m_B^O = \frac{x_B^O - X_B}{y_B^O - Y_B}$$

Pertanto, essendo note le coordinate cartesiane slant (x_A^O, y_A^O) del primo bersaglio nel sistema di riferimento assoluto O , le coordinate cartesiane slant (x_B^O, y_B^O) del secondo bersaglio nel sistema di riferimento assoluto O , le coordinate cartesiane (X_A, Y_A) del centro O_A del sensore A nel sistema di riferimento assoluto O e le coordinate cartesiane (X_B, Y_B) del centro O_B del sensore B nel sistema di riferimento assoluto O , è possibile determinare le coordinate cartesiane (x_0, y_0) del punto d'intersezione P_0 dei vettori posizione delle tracce ST_A e ST_B proiettati sul piano orizzontale di riferimento PO .

In particolare, la condizione sulla direzione dei vettori posizione delle tracce viene verificata, ovvero viene soddisfatta dalle tracce ST_A e ST_B , se si riesce a calcolare dette coordinate cartesiane (x_0, y_0) del punto d'intersezione P_0 .

Inoltre, se la condizione sulla direzione dei vettori

posizione delle tracce viene soddisfatta dalle tracce ST_A e ST_B , allora si passa alla verifica della condizione sui moduli dei vettori posizione delle tracce, ovvero si verifica se i moduli dei vettori posizione $2D$ contenuti nelle tracce ST_A e ST_B e la distanza D tra i centri O_A e O_B dei sensori A e B soddisfano o meno la disuguaglianza triangolare (3).

In particolare, facendo riferimento a quanto mostrato in figura 4, la disuguaglianza triangolare (3) diventa:

$$\rho_A + \rho_B \geq D \pm \delta\rho ,$$

ovvero

$$\rho_A + \rho_B \geq \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2} \pm \delta\rho .$$

Pertanto, essendo note le misure di range ρ_A e ρ_B delle tracce ST_A e ST_B , le coordinate cartesiane (X_A, Y_A, Z_A) del centro O_A del sensore A nel sistema di riferimento assoluto O , le coordinate cartesiane (X_B, Y_B, Z_B) del centro O_B del sensore B nel sistema di riferimento assoluto O , l'errore di misura in range $\delta\rho_A$ del sensore A e l'errore di misura in range $\delta\rho_B$ del sensore B (ricordando che $\delta\rho = \delta\rho_A + \delta\rho_B$), è possibile verificare se la condizione sui moduli dei vettori posizione delle tracce è soddisfatta dalle tracce ST_A e ST_B , ovvero se i moduli dei vettori posizione $2D$ contenuti nelle tracce ST_A e ST_B e la distanza D tra i centri O_A e O_B dei sensori A e B soddisfano la disuguaglianza triangolare.

Inoltre, se la condizione sui moduli dei vettori posizione delle tracce è soddisfatta dalle tracce ST_A e ST_B , allora si passa alla verifica della condizione sulla quota, ovvero si verifica se le tracce ST_A e ST_B consentono di determinare una stessa quota per il primo ed il secondo bersaglio o meno.

In particolare, facendo sempre riferimento a quanto mostrato in figura 4, si ha che:

$$(\rho_A)^2 = (R_A)^2 + (h_0 - Z_A)^2 \quad (4)$$

e

$$(\rho_B)^2 = (R_B)^2 + (h_0 - Z_B)^2 \quad (5)$$

dove h_0 denota un'eventuale stessa quota del primo e del secondo bersaglio e dove

$$(R_A)^2 = (x_0 - X_A)^2 + (y_0 - Y_A)^2 \quad (6)$$

e

$$(R_B)^2 = (x_0 - X_B)^2 + (y_0 - Y_B)^2 \quad (7)$$

Pertanto, se il primo ed il secondo bersaglio hanno la stessa quota h_0 e, quindi, non sono due bersagli distinti ma rappresentano, in verità, uno stesso unico bersaglio, risolvendo le due suddette equazioni di secondo grado aventi come incognita h_0 , deve risultare che:

$$h_0 = Z_A \pm \sqrt{(\rho_A)^2 - (R_A)^2} = Z_B \pm \sqrt{(\rho_B)^2 - (R_B)^2} \quad (8)$$

Pertanto, essendo note le misure di range ρ_A e ρ_B delle tracce ST_A e ST_B , le coordinate cartesiane (X_A, Y_A, Z_A) del centro O_A del sensore A nel sistema di riferimento assoluto

O , le coordinate cartesiane (X_B, Y_B, Z_B) del centro O_B del sensore B nel sistema di riferimento assoluto O e le coordinate cartesiane (x_0, y_0) del punto P_0 (calcolate per la verifica della condizione sulla direzione dei vettori posizione delle tracce), è possibile:

- risolvere l'equazione di secondo grado (4) con l'ausilio dell'equazione (6) e, quindi, determinare, per il primo bersaglio visto dal sensore A e tracciato nella traccia ST_A , due primi valori di h_0 ; e

- risolvere l'equazione di secondo grado (5) con l'ausilio dell'equazione (7) e, quindi, determinare, per il secondo bersaglio visto dal sensore B e tracciato nella traccia ST_B , due secondi valori di h_0 .

Pertanto, se uno dei due primi valori di h_0 è uguale ad uno dei due secondi valori di h_0 , risulta che:

- la condizione sulla quota è soddisfatta dalle tracce ST_A e ST_B e, quindi, anche il test di correlazione è soddisfatto dalle tracce ST_A e ST_B ; ed

- il primo ed il secondo bersaglio rappresentano uno stesso unico bersaglio che ha le coordinate cartesiane (x_0, y_0, h_0) nel sistema di riferimento assoluto O , dove h_0 assume quello stesso valore determinato per entrambi i bersagli, ovvero il valore che soddisfa l'uguaglianza (8).

Sulla base del valore h_0 che soddisfa l'uguaglianza (8) possono, quindi, essere calcolati gli angoli di elevazione

φ_A e φ_B con cui lo stesso unico bersaglio viene visto, rispettivamente, nel primo sistema di riferimento relativo del sensore A e nel secondo sistema di riferimento relativo del sensore B.

In particolare, risulta che:

$$\varphi_A = \arcsin\left(\frac{h_0 - Z_A}{\rho_A}\right)$$

$$\varphi_B = \arcsin\left(\frac{h_0 - Z_B}{\rho_B}\right)$$

Peraltro, un primo caso particolare per l'esecuzione del test di correlazione si ha nel caso in cui i sensori A e B vedano uno stesso bersaglio lungo una linea di simmetria, ovvero, usando un formalismo matematico, quando si ha che $Z_A=Z_B$ e $\rho_A=\rho_B$.

In detto primo caso particolare, si ha che $R_A=R_B$ ed h_0 può assumere due valori, uno corrispondente al segno più e l'altro al segno meno della formula (8).

Per riuscire a determinare la quota in detto primo caso particolare, occorre fare considerazioni di dominio per scegliere la soluzione fisica giusta. Ad esempio, si può escludere il caso di quota negativa e confrontare la soluzione con i dati di predizione precedenti.

Inoltre, un secondo caso particolare per l'esecuzione del test di correlazione si ha nel caso in cui i sensori A e B vedano uno stesso bersaglio lungo una stessa direzione,

ovvero, usando un formalismo matematico, quando si ha che $m_A^O = m_B^O$.

In particolare, se durante la verifica della condizione sulla direzione dei vettori posizione delle tracce, si trova che $m_A^O = m_B^O$, si decide che detta condizione sulla direzione dei vettori posizione è soddisfatta dalle tracce ST_A e ST_B e si passa, quindi, alla verifica della condizione sui moduli dei vettori posizione delle tracce ST_A e ST_B senza calcolare le coordinate cartesiane (x_0, y_0) del punto d'intersezione P_0 .

Se anche la condizione sui moduli dei vettori posizione è soddisfatta dalle tracce ST_A e ST_B , allora si passa alla verifica della condizione sulla quota determinando gli angoli di elevazione φ_A e φ_B mediante una triangolazione eseguita in un piano zx di riferimento perpendicolare alla superficie della Terra e passante per il centro O_A del sensore A e per il centro O_B del sensore B.

A tal riguardo, in figura 5 viene mostrato schematicamente un piano cartesiano zx di riferimento usato per eseguire la verifica della condizione sulla quota nel caso in cui risulti $m_A^O = m_B^O$ secondo una preferita forma di realizzazione della presente invenzione.

In particolare, la figura 5 mostra:

- un punto O_A che rappresenta il centro del sensore A e di cui sono note le coordinate (X_A, Z_A) nel piano

cartesiano zx di riferimento;

- un punto O_B che rappresenta il centro del sensore B e di cui sono note le coordinate (X_B, Z_B) nel piano cartesiano zx di riferimento;

- un punto P che, nel caso in cui le tracce ST_A e ST_B soddisfino la condizione sulla quota, rappresenta il primo bersaglio visto dal sensore A ed il secondo bersaglio visto dal sensore B , è ad una distanza ρ_A dal sensore A e ad una distanza ρ_B dal sensore B ed ha coordinate (x_0, h_0) nel piano cartesiano zx di riferimento;

- una distanza D tra il centro O_A del sensore A ed il centro O_B del sensore B che ha una proiezione d lungo la direzione $\hat{x}$;

- un angolo α compreso tra ρ_B e D ;
- un angolo β compreso tra ρ_A e D ;
- un angolo γ compreso tra ρ_A e ρ_B ;
- un angolo φ_A che rappresenta l'angolo di elevazione con cui è visto il punto P dal sensore A ; ed

- un angolo φ_B che rappresenta l'angolo di elevazione con cui è visto il punto P dal sensore B .

In dettaglio, facendo riferimento a quanto mostrato in figura 5 ed applicando il teorema dei seni, risulta che:

$$\frac{\rho_A}{\sin \alpha} = \frac{\rho_B}{\sin \beta} = \frac{D}{\sin \gamma}$$

Inoltre, applicando anche il teorema di Carnot, si ha

che:

$$D^2 = (\rho_A)^2 + (\rho_B)^2 - 2\rho_A\rho_B \cos \gamma$$

Quindi, essendo noti ρ_A , ρ_B e D , si determinano gli angoli α , β e γ in accordo con le seguenti formule matematiche ricavate sulla base delle due precedenti equazioni ottenute applicando i teoremi dei seni e di Carnet:

$$\begin{aligned}\gamma &= \arccos\left(\frac{(\rho_A)^2 + (\rho_B)^2 - D^2}{2\rho_A\rho_B}\right) \\ \alpha &= \arcsin\left(\frac{\rho_A \sin \gamma}{D}\right) \\ \beta &= 180^\circ - \alpha - \gamma\end{aligned}$$

Infine, poiché risulta che

$$\begin{aligned}\varphi_A - \beta &= \alpha - \varphi_B \\ D \cos(\varphi_A - \beta) &= d\end{aligned}$$

allora è possibile determinare gli angoli di elevazione φ_A e φ_B secondo le seguenti formule:

$$\begin{aligned}\varphi_B &= \alpha - \arccos\left(\frac{d}{D}\right) \\ \varphi_A &= \arccos\left(\frac{d}{D}\right) + \beta\end{aligned}$$

Quindi, sempre facendo riferimento a quanto mostrato in figura 5, nel caso in cui risulti $m_A^0 = m_B^0$, la condizione sulla quota è soddisfatta dalle tracce ST_A e ST_B e, quindi,

anche il test di correlazione è soddisfatto dalle tracce ST_A e ST_B se risulta che:

$$h_O = \rho_A \sin \varphi_A + Z_A = \rho_B \sin \varphi_B + Z_B \quad (9)$$

Una volta terminato il test di correlazione, se si è verificato che detto test di correlazione è soddisfatto dalle tracce ST_A e ST_B , preferibilmente viene determinata anche una velocità 3D sulla base delle tracce 2D ST_A e ST_B ed, in particolare, viene determinata, per ognuna delle due tracce 2D ST_A e ST_B , una rispettiva componente in elevazione della rispettiva velocità contenuta nella traccia 2D.

A tal riguardo, si assume che:

- $\bar{V}_A$ è un primo vettore velocità del bersaglio (si sottolinea che, poiché il test di correlazione è soddisfatto dalle tracce ST_A e ST_B , il primo bersaglio visto dal sensore A e tracciato nella prima traccia 2D slant ST_A è lo stesso bersaglio, ovvero il secondo bersaglio, visto dal sensore B e tracciato nella seconda traccia 2D slant ST_B) in coordinate sferiche nel primo sistema di riferimento relativo del sensore A e comprende una prima componente in elevazione $V_{\varphi A}$ che si vuole calcolare, una prima componente in azimuth $V_{\theta A}$ che è contenuta nella prima traccia 2D slant ST_A ed una prima componente in range $V_{\rho A}$ che è contenuta nella prima traccia 2D slant ST_A ;

- $\bar{V}_B$ è un secondo vettore velocità del bersaglio in coordinate sferiche nel secondo sistema di riferimento relativo del sensore B e comprende una seconda componente in elevazione V_{ϕ_B} che si vuole calcolare, una seconda componente in azimuth V_{θ_B} che è contenuta nella seconda traccia 2D slant ST_B ed una seconda componente in range V_{ρ_B} che è contenuta nella seconda traccia 2D slant ST_B ;

- $\bar{V}$ è un terzo vettore velocità del bersaglio in coordinate cartesiane nel sistema di riferimento assoluto O e comprende una prima componente di velocità V_x lungo la direzione $\hat{x}$, una seconda componente di velocità V_y lungo la direzione $\hat{y}$ ed una terza componente di velocità V_z lungo la direzione $\hat{z}$;

- I_A è una prima matrice di trasformazione da coordinate sferiche a coordinate cartesiane del primo vettore velocità $\bar{V}_A$ in una prima posizione $(\phi_A, \theta_A, \rho_A)$ che rappresenta la posizione del bersaglio in coordinate sferiche nel primo sistema di riferimento relativo del sensore A essendo ϕ_A l'angolo di elevazione nel primo sistema di riferimento relativo del sensore A calcolato nel test di correlazione, θ_A l'angolo di azimuth contenuto nella prima traccia 2D slant ST_A e ρ_A il range contenuto nella prima traccia 2D slant ST_A ; ed

- I_B è una seconda matrice di trasformazione da coordinate sferiche a coordinate cartesiane del secondo

vettore velocità $\bar{V}_B$ in una seconda posizione $(\varphi_B, \theta_B, \rho_B)$ che rappresenta la posizione del bersaglio in coordinate sferiche nel secondo sistema di riferimento relativo del sensore B essendo φ_B l'angolo di elevazione nel secondo sistema di riferimento relativo del sensore B calcolato nel test di correlazione, θ_B l'angolo di azimuth contenuto nella seconda traccia 2D slant ST_B e ρ_B il range contenuto nella seconda traccia 2D slant ST_B .

Pertanto, sulla base di quanto appena descritto, si ha che:

- nella prima posizione $(\varphi_A, \theta_A, \rho_A)$ $\bar{V} = I_A \bar{V}_A$; e
- nella seconda posizione $(\varphi_B, \theta_B, \rho_B)$ $\bar{V} = I_B \bar{V}_B$.

Inoltre, poiché la prima posizione $(\varphi_A, \theta_A, \rho_A)$ e la seconda posizione $(\varphi_B, \theta_B, \rho_B)$ coincidono nel sistema di riferimento assoluto O nei limiti dell'errore di misura, deve risultare che:

$$I_A \bar{V}_A = I_B \bar{V}_B \quad (10)$$

Quindi, risolvendo il sistema di tre equazioni rappresentato dall'equazione matriciale (10) si determinano la prima componente in elevazione $V_{\varphi A}$ e la seconda componente in elevazione $V_{\varphi B}$.

Infine, una volta determinate la prima componente in elevazione $V_{\varphi A}$ e la seconda componente in elevazione $V_{\varphi B}$, è possibile determinare il terzo vettore $\bar{V}$ ed, in particolare, la rispettiva terza componente di velocità V_z

applicando l'equazione $\bar{V} = I_A \bar{V}_A$ o l'equazione $\bar{V} = I_B \bar{V}_B$.

Preferibilmente, il primo sistema di riferimento relativo del sensore A , il secondo sistema di riferimento relativo del sensore B ed il sistema di riferimento assoluto O hanno la stessa orientazione con il rispettivo asse verticale al rispettivo zenit e l'asse y orientato a Nord.

In particolare, il primo sistema di riferimento relativo del sensore A , il secondo sistema di riferimento relativo del sensore B ed il sistema di riferimento assoluto O hanno la stessa orientazione, con il rispettivo asse verticale al rispettivo zenit e l'asse y orientato a Nord, se la distanza D tra i sensori A e B non supera i 25 Km.

Se il primo sistema di riferimento relativo del sensore A , il secondo sistema di riferimento relativo del sensore B ed il sistema di riferimento assoluto O hanno la stessa orientazione, con il rispettivo asse verticale al rispettivo zenit e l'asse y orientato a Nord, la Terra può essere approssimata ad un piano, gli zenit dei sistemi di riferimento relativi dei sensori A e B possono essere considerati paralleli ed il Nord si può considerare comune alle basse latitudini.

Se, invece, la distanza D tra i sensori A e B supera i 25 Km, allora, preferibilmente, vengono usate le coordinate

Geocentriche o si correggono le orientazioni dei sistemi di riferimento relativi mediante gli angoli di Eulero.

Sulla base di quanto descritto finora, la presente invenzione consente di determinare una traccia 3D come fusione di due o più tracce 2D che provengono da diversi sensori di localizzazione di bersagli, sono relative ad uno stesso istante di tempo e che, se soddisfano il test di correlazione, sono ritenute essere relative ad uno stesso oggetto reale.

Il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione trova vantaggiosa, ma non esclusiva, applicazione nella sorveglianza marittima, terrestre ed aerea.

In dettaglio, nell'ambito della sorveglianza marittima, nel caso in cui i sensori di localizzazione di bersagli 2D utilizzati siano dedicati a rilevare solo tracce navali di superficie, il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione consente di scartare eventuali tracce aeree. Infatti, la correzione della cinematica di un bersaglio con il calcolo della quota consente di risolvere l'ambiguità nel caso in cui velivoli a bassa quota, ad esempio elicotteri o aerei, che appaiono all'orizzonte, interferiscano con le tracce navali di superficie.

Inoltre, nella sorveglianza terrestre, ad esempio in

ambito aeroportuale, il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione consente di discriminare e localizzare con maggiore precisione tracce aeree a bassa quota, durante l'atterraggio e il decollo, nelle aree di manovra degli aeroporti.

Infine, nella sorveglianza aerea, il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione consente di discriminare e localizzare con maggiore precisione tracce aeree di velivoli. Ad esempio la presente invenzione potrebbe essere vantaggiosamente sfruttata per realizzare un sistema portatile di sorveglianza aerea che, mediante l'uso di due soli sensori di localizzazione di bersagli 2D, ad esempio non cooperativi, sia in grado di localizzare con precisione tracce aeree 3D.

Per l'applicazione della presente invenzione alla sorveglianza marittima, superficiale e aerea, risulta significativo distinguere fra la localizzazione di tracce 3D appartenenti al dominio di superficie o aereo.

A tal riguardo, in figura 6 viene mostrato schematicamente:

- un cerchio 16 che rappresenta la Terra; ed
- un sensore di localizzazione di bersagli 2D 17 che
 - è posizionato sulla superficie della Terra

- 16, e, quindi, si trova ad una distanza R_T dal centro della Terra 16, dove R_T rappresenta il raggio della Terra 16,
- rivela ad una distanza ρ un bersaglio 18 che è posizionato ad una distanza, ovvero una quota, H dalla superficie della Terra 16, e
 - presenta un errore lineare massimo di misura Err_{MAX} ; ed

- un angolo Φ_{target} che ha vertice nel centro della Terra 16, e che è sotteso tra la posizione del sensore di localizzazione di bersagli 2D 17 e la posizione del bersaglio 18.

Sulla base di quanto mostrato in figura 6, risulta che:

$$H = R_T \sec \Phi_{target} - R_T$$

Preferibilmente, si parla di dominio di ricerca di superficie se l'ordine di grandezza della quota H del bersaglio 18 è:

$$H = R_T \sec \Phi_{target} - R_T \leq Err_{MAX}$$

Quindi, nella sorveglianza marittima e superficiale, data una prima traccia 2D di un primo sensore di localizzazione di bersagli 2D, le tracce 2D di un secondo sensore di localizzazione di bersagli 2D che possono essere correlate con detta prima traccia 2D possono essere, convenientemente, ricercate in un intorno della prima traccia 2D, poiché la posizione del bersaglio vista da

entrambi i sensori di localizzazione di bersagli $2D$ cade in una finestra di correlazione limitata che dipende dall'errore dei sensori di localizzazione di bersagli $2D$ e dalla storia del bersaglio. Ad esempio, i radar primari costieri o navali possono importare il calcolo della quota senza dover modificare il criterio di ricerca delle tracce correlabili limitato alle finestre d'errore nell'intorno della prima traccia $2D$.

Inoltre, sempre preferibilmente, si parla di dominio di ricerca aereo se l'ordine di grandezza della quota H del bersaglio 18 è:

$$H = R_T \sec \Phi_{target} - R_T > Err_{MAX}$$

Quindi, nella sorveglianza aerea, la ricerca avviene su tutte le tracce $2D$. Infatti, nella sorveglianza aerea, all'arrivo di una nuova traccia $2D$ da un sensore di localizzazione di bersagli $2D$, questa va confrontata, mediante il test di correlazione, con tutte le tracce $2D$ acquisite dagli altri sensori di localizzazione di bersagli $2D$.

Il criterio di ricerca per il dominio aereo include il caso di dominio di superficie che ne è, quindi, un sottoinsieme.

Pertanto, il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore con criterio di ricerca su tutte le tracce $2D$ funziona in qualsiasi dominio.

Dalla precedente descrizione si possono immediatamente comprendere i vantaggi della presente invenzione.

In particolare, si vuole qui sottolineare ancora una volta come la presente invenzione consenta di determinare, sulla base di dati cinematici prodotti da tracciatori di almeno due sensori di localizzazione di bersagli 2D aventi una regione di copertura condivisa, una traccia tridimensionale di un bersaglio presente in detta regione di copertura condivisa.

Inoltre, il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la presente invenzione è applicabile con un qualsiasi numero N di sensori di localizzazione di bersagli 2D, con $N > 1$, i quali

- possono essere tutti cooperativi, oppure tutti non cooperativi, oppure alcuni cooperativi ed altri non cooperativi; e
- possono essere posizionati tutti a terra, anche a diverse quote, oppure possono essere installati tutti su rispettivi mezzi in movimento, oppure alcuni possono essere installati su rispettivi mezzi in movimento ed altri possono essere posizionati a terra.

Infine, risulta chiaro che varie modifiche possono essere apportate alla presente invenzione, tutte rientranti nell'ambito di tutela dell'invenzione definito nelle rivendicazioni annesse.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo di tracciamento tridimensionale multisensore comprendente:

- acquisire una prima traccia bidimensionale di un primo bersaglio ad un dato tempo generata da un primo tracciatore (3) di un primo sensore di localizzazione di bersagli (2, 11, A) avente una prima area di copertura (13);

- acquisire una seconda traccia bidimensionale di un secondo bersaglio al dato tempo generata da un secondo tracciatore (3) di un secondo sensore di localizzazione di bersagli (2, 12, B) avente una seconda area di copertura (14) che si sovrappone parzialmente alla prima area di copertura (13) in una regione di copertura (15) condivisa da detti sensori di localizzazione di bersagli (2, 11, 12, A, B), il primo sensore di localizzazione di bersagli (2, 11, A) ed il secondo sensore di localizzazione di bersagli (2, 12, B) essendo mutuamente distanziati di una data distanza (D);

- eseguire un test di correlazione sulla base della prima traccia bidimensionale, della seconda traccia bidimensionale e della data distanza (D) per verificare se il primo bersaglio ed il secondo bersaglio rappresentano uno stesso unico bersaglio (T, P) presente nella regione di copertura condivisa (15); e,

- se il primo bersaglio ed il secondo bersaglio rappresentano uno stesso unico bersaglio (T, P) presente nella regione di copertura condivisa (15), generare una traccia tridimensionale di detto stesso unico bersaglio (T, P) al dato tempo.

2. Il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore della rivendicazione 1, in cui la data distanza (D) soddisfa una data relazione con un dato errore massimo di misura di detti sensori di localizzazione di bersagli $(2, 11, 12, A, B)$.

3. Il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore della rivendicazione 2, in cui il primo sensore di localizzazione di bersagli $(2, 11, A)$ ha un primo errore massimo di misura, in cui il secondo sensore di localizzazione di bersagli $(2, 12, B)$ ha un secondo errore massimo di misura ed in cui il dato errore massimo di misura è uguale al maggiore tra il primo errore massimo di misura ed il secondo errore massimo di misura.

4. Il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo una qualsiasi rivendicazione precedente, in cui la prima traccia bidimensionale comprende un primo vettore bidimensionale che rappresenta una prima posizione bidimensionale del primo bersaglio al dato tempo in un primo sistema di riferimento bidimensionale relativo del primo sensore di localizzazione

di bersagli $(2, 11, A)$;

in cui la seconda traccia bidimensionale comprende un secondo vettore bidimensionale che rappresenta una seconda posizione bidimensionale del secondo bersaglio al dato tempo in un secondo sistema di riferimento bidimensionale relativo del secondo sensore di localizzazione di bersagli $(2, 12, B)$;

in cui eseguire un test di correlazione comprende:

- verificare se il primo vettore bidimensionale ed il secondo vettore bidimensionale soddisfano una prima condizione in un dato sistema di riferimento tridimensionale;

- se il primo vettore bidimensionale ed il secondo vettore bidimensionale soddisfano la prima condizione nel dato sistema di riferimento tridimensionale, verificare se il primo vettore bidimensionale, il secondo vettore bidimensionale e la data distanza (D) soddisfano una seconda condizione;

- se il primo vettore bidimensionale, il secondo vettore bidimensionale e la data distanza (D) soddisfano la seconda condizione, verificare se, sulla base del primo vettore bidimensionale e del secondo vettore bidimensionale, una stessa quota (h_0) viene determinata per il primo bersaglio ed il secondo bersaglio nel dato sistema di riferimento tridimensionale; e

- se, sulla base del primo vettore bidimensionale e del secondo vettore bidimensionale, una stessa quota (h_0) viene determinata per il primo bersaglio ed il secondo bersaglio nel dato sistema di riferimento tridimensionale, rivelare che il primo bersaglio ed il secondo bersaglio rappresentano uno stesso unico bersaglio (T, P) presente nella regione di copertura condivisa (15);

ed in cui generare una traccia tridimensionale di detto stesso unico bersaglio (T, P) al dato tempo comprende:

- generare una traccia tridimensionale di detto stesso unico bersaglio (T, P) al dato tempo comprendente una posizione tridimensionale di detto stesso unico bersaglio (T, P) al dato tempo nel dato sistema di riferimento tridimensionale, detta posizione tridimensionale comprendendo la stessa quota (h_0) determinata per il primo bersaglio ed il secondo bersaglio nel dato sistema di riferimento tridimensionale.

5. Il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore della rivendicazione 4, in cui verificare se il primo vettore bidimensionale ed il secondo vettore bidimensionale soddisfano una prima condizione nel dato sistema di riferimento tridimensionale comprende:

- determinare una prima quantità indicativa di una direzione del primo vettore bidimensionale nel dato sistema di riferimento tridimensionale;

- determinare una seconda quantità indicativa di una direzione del secondo vettore bidimensionale nel dato sistema di riferimento tridimensionale; e

- verificare se la prima quantità e la seconda quantità soddisfano la prima condizione.

6. Il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo la rivendicazione 4 o 5, in cui il primo vettore bidimensionale ha un primo modulo, in cui il secondo vettore bidimensionale ha un secondo modulo ed in cui verificare se il primo vettore bidimensionale, il secondo vettore bidimensionale e la data distanza (D) soddisfano una seconda condizione comprende:

- verificare se il primo modulo, il secondo modulo, la data distanza (D) e rispettivi errori di misura in modulo di detti sensori di localizzazione di bersagli (2, 11, 12, A , B) soddisfano una relazione di disuguaglianza triangolare.

7. Il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo una qualsiasi rivendicazione 4-6, in cui la prima traccia bidimensionale comprende anche un terzo vettore bidimensionale che rappresenta una prima velocità bidimensionale del primo bersaglio al dato tempo nel primo sistema di riferimento bidimensionale relativo;

in cui la seconda traccia bidimensionale comprende anche un quarto vettore bidimensionale che rappresenta una

seconda velocità bidimensionale del secondo bersaglio al dato tempo nel secondo sistema di riferimento bidimensionale relativo;

ed in cui detta traccia tridimensionale generata comprende anche una velocità tridimensionale di detto stesso unico bersaglio (T, P) al dato tempo nel dato sistema di riferimento tridimensionale, detta velocità tridimensionale essendo determinata sulla base:

- del primo vettore bidimensionale;
- di una terza quantità che è legata alla stessa quota (h_0) determinata per il primo bersaglio ed il secondo bersaglio nel dato sistema di riferimento tridimensionale e che è indicativa di una prima quota del primo bersaglio al dato tempo nel primo sistema di riferimento bidimensionale relativo;

- del secondo vettore bidimensionale;
- di una quarta quantità che è legata alla stessa quota (h_0) determinata per il primo bersaglio ed il secondo bersaglio nel dato sistema di riferimento tridimensionale e che è indicativa di una seconda quota del secondo bersaglio al dato tempo nel secondo sistema di riferimento bidimensionale relativo;

- del terzo vettore bidimensionale; e
- del quarto vettore bidimensionale.

8. Elaboratore elettronico (4) configurato per

implementare il metodo di tracciamento tridimensionale multisensore secondo una qualsiasi rivendicazione precedente.

9. Sistema di tracciamento tridimensionale multisensore (1) comprendente:

- un primo sensore di localizzazione di bersagli (2, 11, A) che ha una prima area di copertura (13) e comprende un primo tracciatore (3) configurato per generare tracce bidimensionali di bersagli rivelati dal primo sensore di localizzazione di bersagli (2, 11, A);

- almeno un secondo sensore di localizzazione di bersagli (2, 12, B) che ha una seconda area di copertura (14) parzialmente sovrapposta alla prima area di copertura (13), è distanziato dal primo sensore di localizzazione di bersagli (2, 11, A) di una data distanza (D) e comprende un secondo tracciatore (3) configurato per generare tracce bidimensionali di bersagli rivelati dal secondo sensore di localizzazione di bersagli (2, 12, B); e

- l'elaboratore elettronico (4) della rivendicazione 8 accoppiato al primo tracciatore (1) ed al secondo tracciatore (3) per acquisire da questi le rispettive tracce bidimensionali generate.

10. Programma software caricabile in una memoria di un elaboratore elettronico (4) e comprendente porzioni di codice configurate per implementare il metodo di

tracciamento tridimensionale multisensore secondo una
qualsiasi rivendicazione 1-7.

p.i.: SELEX SISTEMI INTEGRATI S.P.A.

Mirko BERGADANO

CLAIMS

1. Multi-sensor three-dimensional tracking method comprising:

- acquiring a first two-dimensional track of a first target at a given time generated by a first tracker (3) of a first target locating sensor (2, 11, A) having a first covering area (13);

- acquiring a second two-dimensional track of a second target at the given time generated by a second tracker (3) of a second target locating sensor (2, 12, B) having a second covering area (14) that partially overlaps with the first covering area (13) in a covering region (15) shared by said target locating sensors (2, 11, 12, A, B), the first target locating sensor (2, 11, A) and the second target locating sensor (2, 12, B) being mutually spaced apart by a given distance (D);

- performing a correlation test on the basis of the first two-dimensional track, of the second two-dimensional track and of the given distance (D) so as to check whether the first target and the second target represent a same single target (T, P) present in the shared covering region (15); and,

- if the first target and the second target represent a same single target (T, P) present in the shared covering

region (15), generating a three-dimensional track of said same single target (T, P) at the given time.

2. The multi-sensor three-dimensional tracking method of claim 1, wherein the given distance (D) satisfies a given relation with a given maximum measuring error of said target locating sensors $(2, 11, 12, A, B)$.

3. The multi-sensor three-dimensional tracking method of claim 2, wherein the first target locating sensor $(2, 11, A)$ has a first maximum measuring error, wherein the second target locating sensor $(2, 12, B)$ has a second maximum measuring error, and wherein the given maximum measuring error equals the greater of the first maximum measuring error and the second maximum measuring error.

4. The multi-sensor three-dimensional tracking method according to any preceding claim, wherein the first two-dimensional track comprises a first two-dimensional vector that represents a first two-dimensional position of the first target at the given time in a first relative two-dimensional reference system of the first target locating sensor $(2, 11, A)$;

wherein the second two-dimensional track comprises a second two-dimensional vector that represents a second two-dimensional position of the second target at the given time in a second relative two-dimensional reference system of

the second target locating sensor $(2, 12, B)$;

wherein performing a correlation test comprises:

- checking whether the first two-dimensional vector and the second two-dimensional vector satisfy a first condition in a given three-dimensional reference system;

- if the first two-dimensional vector and the second two-dimensional vector satisfy the first condition in the given three-dimensional reference system, checking whether the first two-dimensional vector, the second two-dimensional vector and the given distance (D) satisfy a second condition;

- if the first two-dimensional vector, the second two-dimensional vector and the given distance (D) satisfy the second condition, checking whether, on the basis of the first two-dimensional vector and the second two-dimensional vector, a same height (h_0) is determined for the first target and the second target in the given three-dimensional reference system; and

- if, on the basis of the first two-dimensional vector and of the second two-dimensional vector, a same height (h_0) is determined for the first target and the second target in the given three-dimensional reference system, detecting that the first target and the second target represent a same single target (T, P) present in the

shared covering region (15);

and wherein generating a three-dimensional track of said same single target (T, P) at the given time comprises:

- generating a three-dimensional track of said same single target (T, P) at the given time comprising a three-dimensional position of said same single target (T, P) at the given time in the given three-dimensional reference system, said three-dimensional position comprising the same height (h_0) determined for the first target and the second target in the given three-dimensional reference system.

5. The multi-sensor three-dimensional tracking method of claim 4, wherein checking whether the first two-dimensional vector and the second two-dimensional vector satisfy a first condition in the given three-dimensional reference system comprises:

- determining a first quantity indicative of a direction of the first two-dimensional vector in the given three-dimensional reference system;

- determining a second quantity indicative of a direction of the second two-dimensional vector in the given three-dimensional reference system; and

- checking whether the first quantity and the second quantity satisfy the first condition.

6. The multi-sensor three-dimensional tracking method

according to claim 4 or 5, wherein the first two-dimensional vector has a first modulus, wherein the second two-dimensional vector has a second modulus, and wherein checking whether the first two-dimensional vector, the second two-dimensional vector and the given distance (D) satisfy a second condition comprises:

- checking whether the first modulus, the second modulus, the given distance (D) and respective modulus measurement errors of said target locating sensors ($2, 11, 12, A, B$) satisfy a triangle inequality relation.

7. The multi-sensor three-dimensional tracking method according to any claim 4-6, wherein the first two-dimensional track also comprises a third two-dimensional vector that represents a first two-dimensional speed of the first target at the given time in the first relative two-dimensional reference system;

wherein the second two-dimensional track also comprises a fourth two-dimensional vector that represents a second two-dimensional speed of the second target at the given time in the second relative two-dimensional reference system;

and wherein said generated three-dimensional track also comprises a three-dimensional speed of said same single target (T, P) at the given time in the given three-

dimensional reference system, said three-dimensional speed being determined on the basis of:

- the first two-dimensional vector;
- a third quantity that is related to the same height (h_0) determined for the first target and the second target in the given three-dimensional reference system and that is indicative of a first height of the first target at the given time in the first relative two-dimensional reference system;

- the second two-dimensional vector;
- a fourth quantity that is related to the same height (h_0) determined for the first target and the second target in the given three-dimensional reference system and that is indicative of a second height of the second target at the given time in the second relative two-dimensional reference system;

- the third two-dimensional vector; and
- the fourth two-dimensional vector.

8. Electronic processor (4) configured to implement the multi-sensor three-dimensional tracking method according to any preceding claim.

9. Multi-sensor three-dimensional tracking system (1) comprising:

- a first target locating sensor (2, 11, A) that has

a first covering area (13) and comprises a first tracker (3) configured to generate two-dimensional tracks of targets detected by the first target locating sensor (2, 11, A);

- at least one second target locating sensor (2, 12, B) that has a second covering area (14) partially overlapped with the first covering area (13), is spaced apart from the first target locating sensor (2, 11, A) by a given distance (D), and comprises a second tracker (3) configured to generate two-dimensional tracks of targets detected by the second target locating sensor (2, 12, B); and

- the electronic processor (4) of claim 8 coupled with the first tracker (1) and with the second tracker (3) to acquire the respective generated two-dimensional tracks therefrom.

10. Computer software loadable on a memory of an electronic processor (4) comprising code portions configured to implement the multi-sensor three-dimensional tracking method according to any claim 1-7.

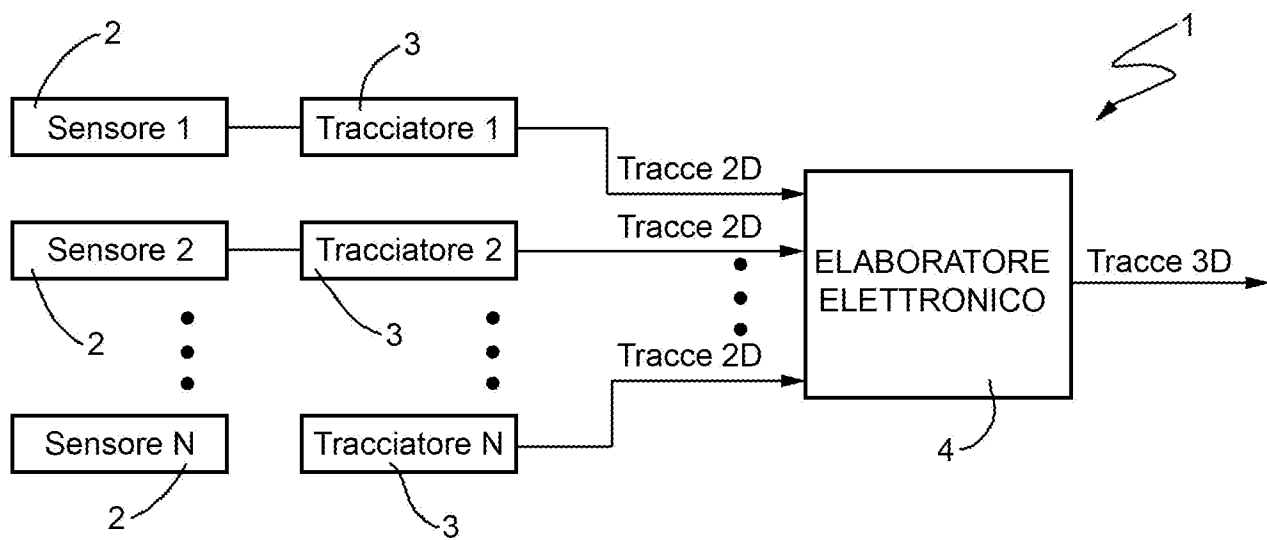


FIG. 1

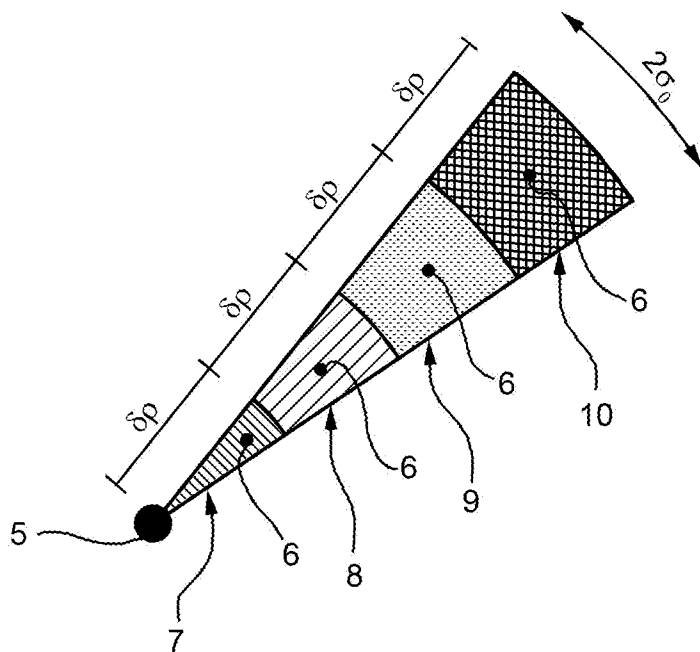


FIG. 2

p.i.: SELEX SISTEMI INTEGRATI S.P.A.

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

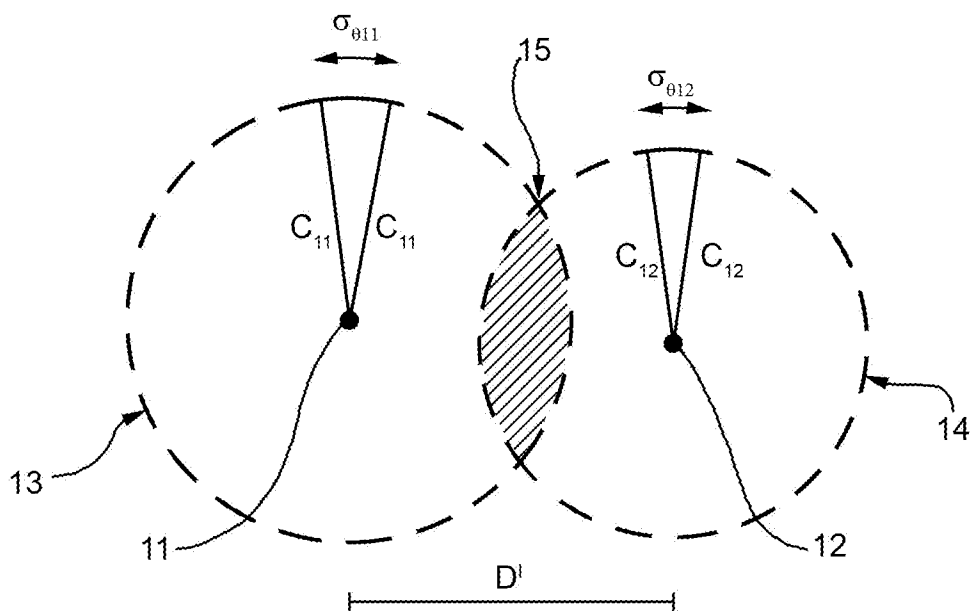


FIG. 3

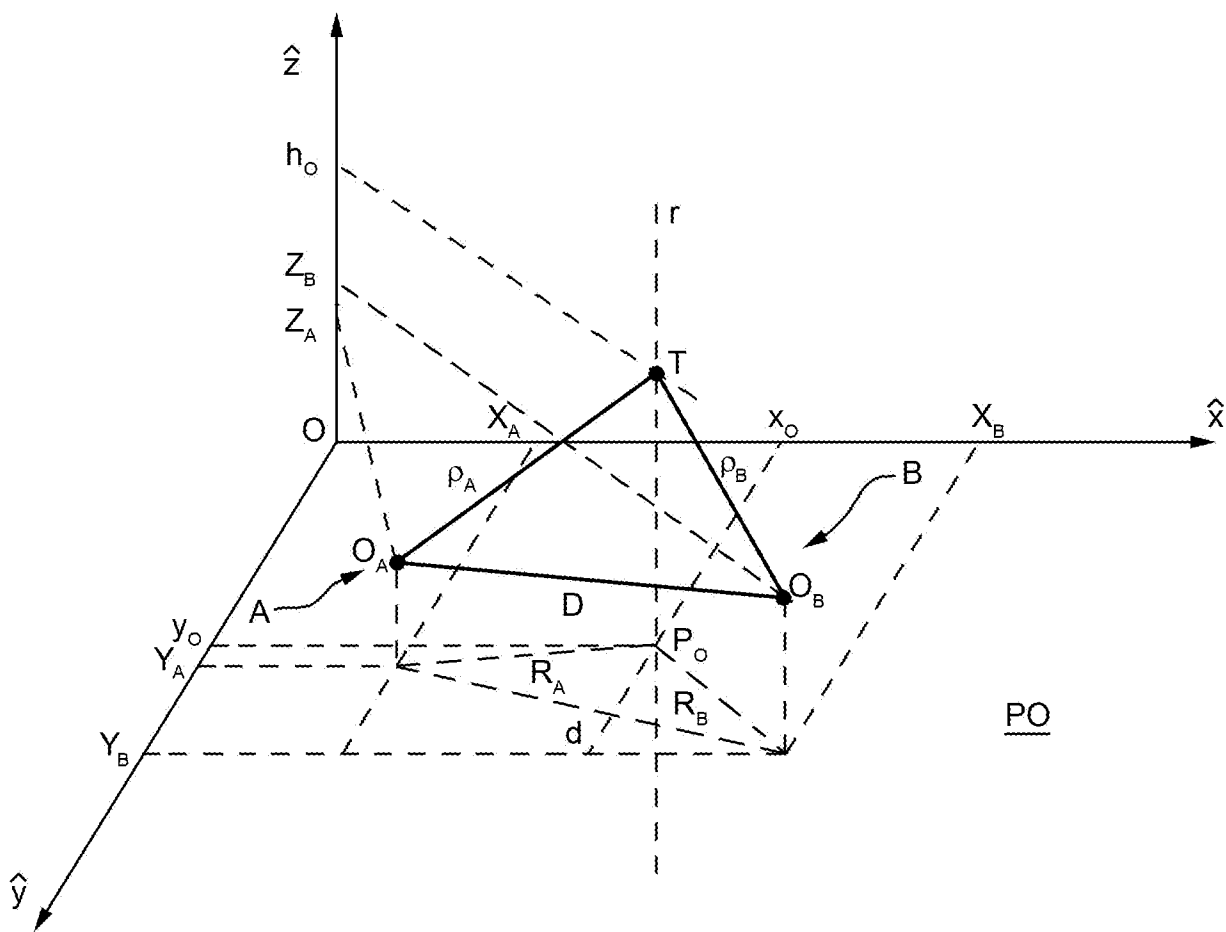


FIG. 4

p.i.: SELEX SISTEMI INTEGRATI S.P.A.

Mirko BERGADANO
(Iscrizione Albo nr. 843/BM)

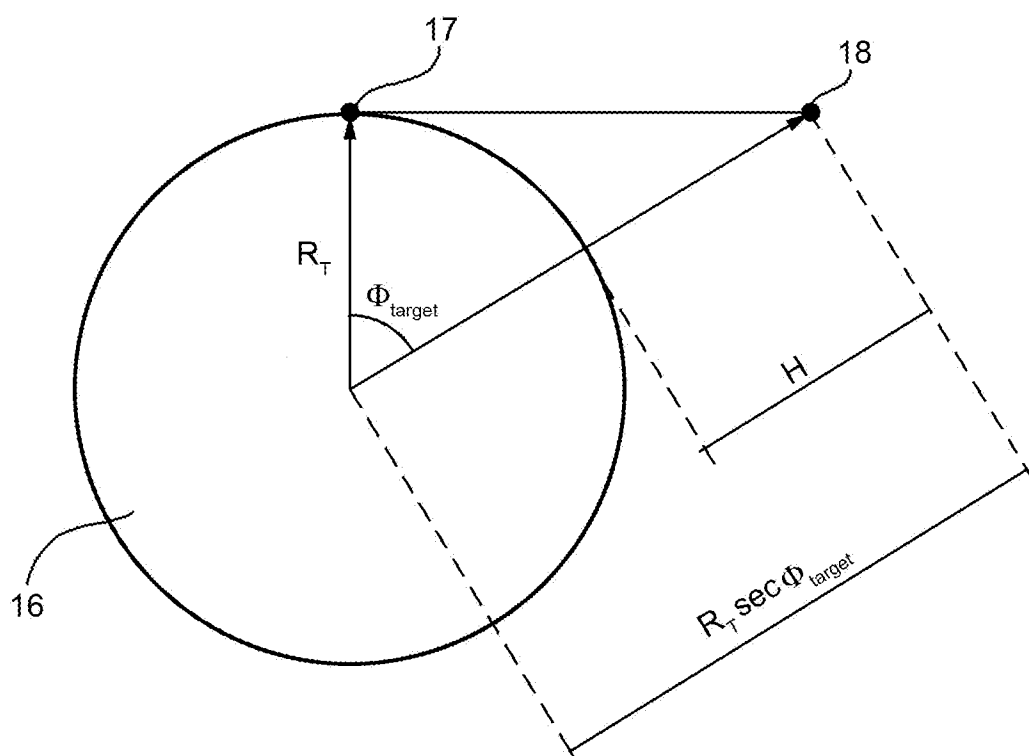
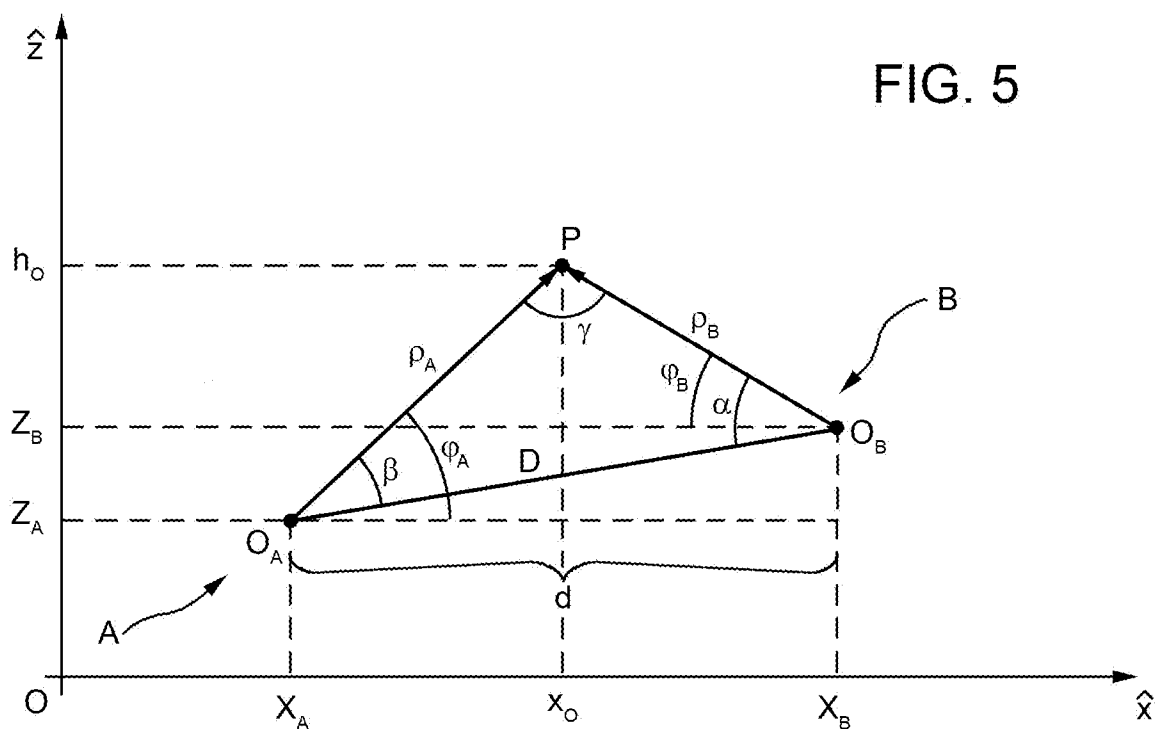


FIG. 6