



Il calcolo del vento

Il prototipo di un piccolo strumento offre risultati incoraggianti

*Un apparecchio monofunzione:
indica il vento senza sonde né collegamenti*

Parecchi anni prima di rendere pubblico il progetto Anemoi, il suo ideatore Benjamin Bachmaier ha raccolto i pareri di numerosi piloti riguardo alle carenze dei sistemi di calcolo del vento, giungendo a due conclusioni principali:

1) c'è grande bisogno di un dispositivo affidabile e autonomo, e 2) sono in circolazione molte idee sbagliate sui metodi per calcolare il vento effettivo. Le idee vanno da "È facile, basta risolvere il triangolo del vento", all'opinione che non sia affatto possibile determinare il vento con sufficiente precisione, soprattutto in volo rettilineo. Entrambe le opinioni sono sbagliate: la verità è molto più complessa.

Bachmaier sul suo blog <https://fly-anemoi.de/blog.html> ha cercato di fare divulgazione su questo tema, mantenendo una forma accessibile ai più. Ecco la sua filosofia.



La semplice grafica del display di Anemoi, piccolo strumento che calcola e indica il vento grazie ad avanzati algoritmi e alla piattaforma inerziale

La soluzione del triangolo del vento

Ogni approccio di calcolo si basa sul triangolo del vento, lo stesso che abbiamo disegnato durante le lezioni di navigazione (e probabilmente mai più usato in seguito). Teoricamente è sufficiente conoscere la lunghezza e la direzione del *vettore assoluto al suolo (GPS)* e del *vettore airspeed* per determinare la loro differenza, che consiste nel desiderato vettore del vento. Per la Velocità al suolo, sono disponibili informazioni GPS accurate. La lunghezza del vettore Velocità all'aria può essere ottenuta dall'anemometro, ma non è la velocità dell'aria indicata che ci serve, bensì la *True Airspeed*, che è calcolata a partire dalla pressione dinamica (Pitot) e dalla densità dell'aria (temperatura, altitudine) e può differire drasticamente dalla *Indicated Airspeed*. L'orientamento del vettore velocità dell'aria si potrebbe ottenere dalla bussola magnetica (meccanica come nello Zander, o elettronica). Tutto sommato, le due incognite (la direzione e la velocità del vento) si esprimono in due equazioni, che si ottengono quando si sottraggono le componenti nord ed est dei vettori "assoluto al suolo" e "airspeed", rispettivamente. Matematicamente, ciò funziona perfettamente.

Immaginiamo un aliante che stia volando a 130 km/h di velocità reale, in presenza di un vento al traverso di 20 km/h. Nella **parte superiore del grafico 1** è mostrato il triangolo del vento. Ma, prima, guardiamo in

faccia la realtà: anche se abbiamo un buon GPS, cioè il vettore assoluto al suolo, e una True airspeed accuratamente calibrata con pressione e temperatura, potrebbe esserci un problema con la prua, cioè la direzione del vettore Airspeed. La bussola magnetica è calibrata correttamente? La tabella delle deviazioni è corretta? Quanto è grande il disallineamento? Il filo di lana è perfettamente centrato, oppure viene introdotto un aggiuntivo errore di lettura della prua? Ecco quindi almeno quattro ragioni che contribuiscono al fatto che è quasi impossibile conoscere la direzione del vettore True Airspeed con la necessaria precisione di un grado. Quindi assumiamo ottimisticamente che la direzione sia nota, se non esattamente, almeno con un errore di "soli" 3°.

E ora disegniamo il triangolo del vento, come si vede nella **parte inferiore del grafico 1**. Invece dei 20 km/h veri, l'errore di prua di 3° comporta il risultato di 28 km/h, cioè una sovrastima del vento pari al 40% pur essendo molto ottimisti. Cosa succede se l'aliante sta volando a 200 km/h invece che a 130 km/h, e l'errore di prua è più di 5 gradi? Si ha l'85% di errore.

Per calcolare il vento correttamente, abbiamo due alternative. Si potrebbe cercare di procurarsi, oltre alla conoscenza esatta del vettore assoluto al suolo (abbastanza fattibile) e della True Airspeed, anche e soprattutto un rilevamento assolutamente esatto della prua; o in alternativa si cerca un altro approccio.

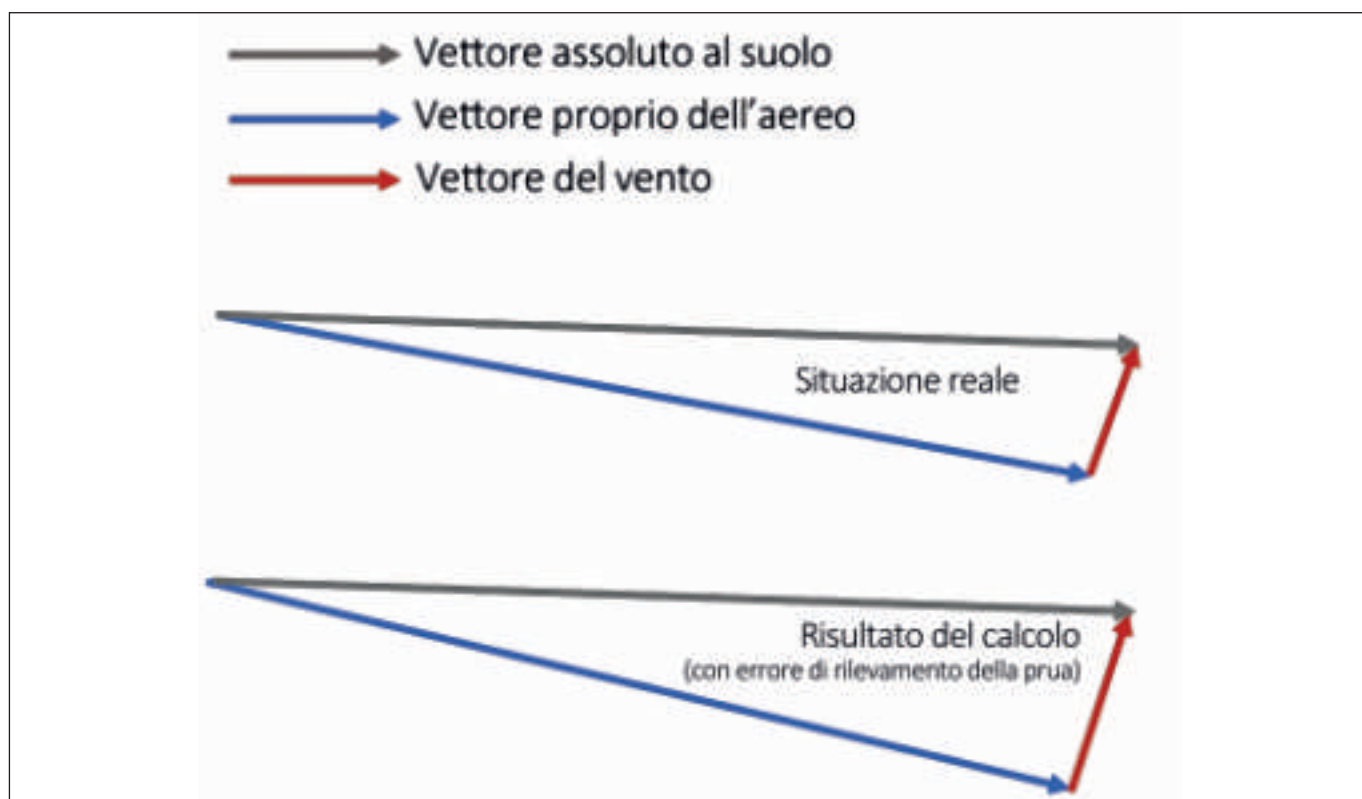


Grafico 1: il ben noto triangolo del vento. Inserendo un errore nel rilevamento della prua aliante, il calcolo fornisce soluzioni sempre meno verosimili all'aumentare della velocità di volo

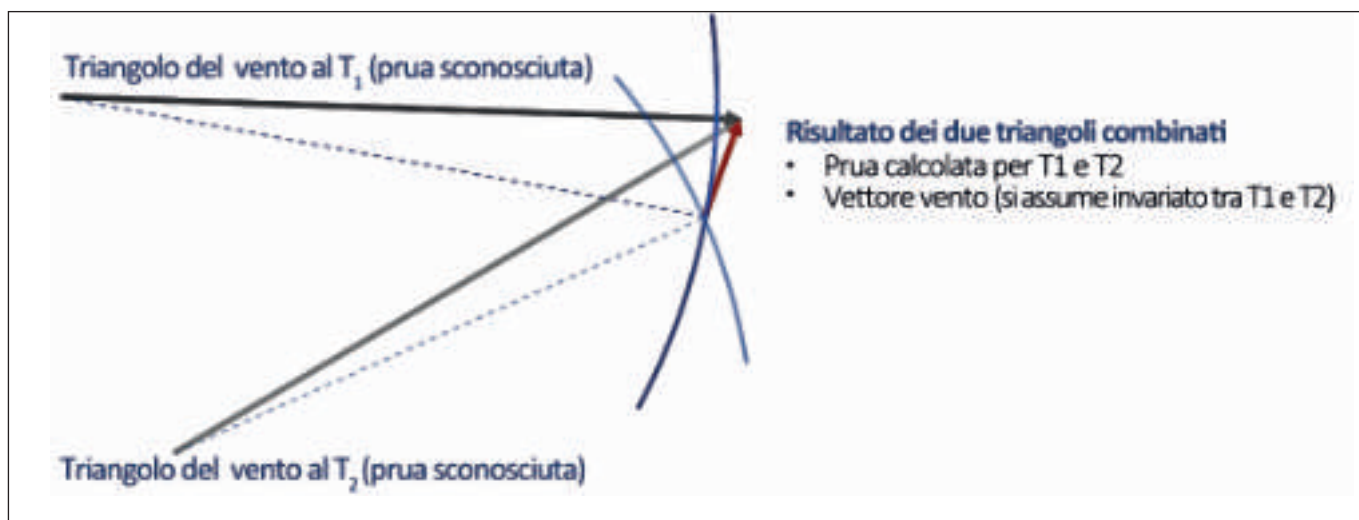


Grafico 2: sovrapposizione di due triangoli del vento in tempi diversi ma molto ravvicinati: le due soluzioni trigonometriche coincidono in un punto solo, che sottende l'unico vettore del vento esatto

Un altro approccio

Cosa è meglio di un triangolo del vento? Risposta: due triangoli del vento! Nel **grafico 2**, il primo esempio è mostrato di nuovo in alto. Questa volta, però, il vettore Velocità dell'aria è tratteggiato, in modo che sia chiaro che non conosciamo la sua direzione ma solo la sua lunghezza. Senza prua, il vettore del vento potrebbe disporsi in qualunque direzione, purché abbia termine nella parte superiore del vettore "suolo" e l'inizio alla distanza che indica la True Airspeed dalla parte inferiore del vettore "suolo" - cioè tracciando un arco. Ora includiamo un secondo triangolo del vento

di questo tipo, calcolato dopo che l'aliante ha cambiato la sua prua. Di nuovo, la direzione è sconosciuta ma, grazie alla velocità nota, il vettore vento può essere solo su un arco intorno alla base del nuovo vettore assoluto al suolo. I due archi s'intersecano in un solo punto. Resta un solo vettore possibile che descrive la cinetica di questa situazione. Se aggiungiamo la ragionevole supposizione che il vettore del vento non sia cambiato nel breve periodo di tempo, abbiamo appena determinato il vento senza dover conoscere la prua. Vale cioè la pena di non guardare solo un'"istantanea", ma di osservare l'evoluzione del triangolo del vento nel tempo.



- Sistemi fotovoltaici
- Pensiline e carport

- Accumulo di energia
- Illuminazione a LED

- Noleggio operativo
- Assistenza e monitoraggio

GRUPPO ELMEC | 50 ANNI DI AFFIDABILITÀ, 15 ANNI DI ESPERIENZA NELLE RINNOVABILI

Elmec Solar srl - Via Pire 1-21020 Brunello (VG) - info@elmecolar.com - T. 0332 902111 - elmecolar.com



Algoritmi in forma chiusa

Se si includono numerosi punti di tempo, il sistema diventa sovradeterminato, per cui ci sono più equazioni che incognite. In questo caso le soluzioni non si trovano con un calcolo analitico perché i vari triangoli del vento possono facilmente contraddirsi a vicenda e non c'è più un'intersezione uniforme tra gli archi circolari spiegati sopra: piuttosto, si forma una "nuvola" di intersezioni individuali più o meno ravvicinate. La ragione è che sono inevitabili piccoli errori di misurazione nei vettori "suolo" e True Airspeed, e che il vento cambia naturalmente nel tempo. Con l'aiuto di tale "nuvola" di soluzioni individuali, tuttavia, possiamo permetterci di non conoscere esattamente altre variabili del sistema, oltre alla prua. Per esempio un valore stimato di True Airspeed, il cui calcolo è facile, può ora essere risolto retrospettivamente per tutti i triangoli di vento "all'indietro" sul vento determinato. Se questi valori di Airspeed previsti vengono poi confrontati con i valori misurati dal tubo di Pitot, è possibile determinare un fattore di calibrazione medio per la misurazione della pressione dinamica. Questo fattore può essere già applicato alle misurazioni successive per ottenere delle "nuvole di soluzioni" ancora più accurate, cioè più ristrette. Si viene così a creare un sistema capace di auto-migliorare le proprie misure osservando la loro evoluzione nel tempo.



Un algoritmo in forma chiusa può essere formulato come un filtro di Kalman esteso (EKF). Un'interessante deduzione, applicazione e analisi di questo concetto è stata presentata da Cho et al. (2011). Nel volo a vela queste formule vengono usate ogni giorno da centinaia di piloti per il calcolo del vento tramite il programma di navigazione XCSOAR (e con qualche modifica, anche con LK8000, N.d.R.). Eliminata la necessità di avere la prua effettiva tra i dati alla base del calcolo, ci troviamo con un problema che non avevamo col triangolo del vento classico: ci servono dei cambiamenti di rotta per generare i diversi triangoli di vento che formano la "nuvola" di risultati, e inoltre dobbiamo sperare che il vento rimanga in gran parte costante nell'intervallo di tempo. Finora, gli strumenti hanno usato solo la True Airspeed e le informazioni del GPS come fonti di dati per il calcolo del vento. Zander ha saputo integrare una bussola meccanica con discreti risultati. L'implementazione del filtro di Kalman in XCSOAR ed LK8000 è, secondo lo stato attuale dell'arte, il meglio che si può ottenere da due sole fonti di dati - e non funziona male, finché non ci sono lunghe planate rettilinee senza cambi di rotta.

"Osservabilità"

Nel **grafico 2** si nota che i triangoli del vento non devono sovrapporsi completamente, perché altrimenti gli archi circolari non si intersecherebbero. La raccolta dei dati richiede delle variazioni di rotta. Uno studio matematicamente più approfondito sulla "misurabilità" dei dati di vento e prua senza un sensore magnetico, in relazione al movimento dell'aereo, è stato condotto da Myschik (2011) che ha concluso che la prua e il vento non sono completamente misurabili soltanto quando l'aereo vola stabilmente in linea retta per lunghi periodi. Più recentemente, Huang, Meyr et al. (2020) hanno usato metodi matematici a tempo discreto per analizzare l'osservabilità dei dati e il comportamento dinamico del filtro di Kalman esteso. Sono riusciti a dimostrare che i cambiamenti casuali nel movimento tridimensionale della massa d'aria sono sufficienti per stimare il movimento tridimensionale della massa d'aria in tempo reale con un'adeguata fusione di sensori, anche in assenza di variazioni di rotta (Nota: il Prof. Heinrich Meyr è un pilota di alianti alla SFG Werdenfels).

Entra in gioco la piattaforma inerziale

Nell'ultimo decennio gli accelerometri e i sensori di velocità angolare sono diventati disponibili in formati miniaturizzati pur conservando una precisione sorprendente.

Un algoritmo per fonderli con i sensori GPS e Pitot in un filtro di Kalman esteso per la determinazione di posizione, velocità e assetto per i piccoli droni è stato presentato da Beard e McLain (2011).

Un'altra idea per la fusione dei dati di navigazione e calcolo del vento è stata dimostrata da Stefan Leutenegger (2014) (Nota: ricercatore, e pilota di alianti svizzero). Poiché il caso studiato da Leutenegger concerneva droni in volo perenne a propulsione elettrica fotovoltaica, la soluzione prevedeva di usare anche una bussola magnetica per garantire l'osservabilità della prua e del vento anche su percorsi rettilinei molto lunghi. Il lavoro di Leutenegger è stato adottato anche nel variometro Butterfly, che ha un'ottima reputazione per quanto riguarda la misurazione del vento.

I più recenti studi continuano a sviluppare queste idee: Huang e Meyr (2020) hanno esteso l'EKF con una modellazione del comportamento aerodinamico, per fornire non solo le componenti orizzontali del vento, ma anche il movimento verticale della massa d'aria in tempo reale - un approccio che offre un grande potenziale per i moderni concetti di variometro netto, oltre al calcolo del vento.

(Dal poco che si conosce del nuovo variometro inerziale Borgelt *Dynamis* australiano, questo potrebbe essere il "segreto" che Mike Borgelt custodisce tanto gelosamente da suscitare scetticismo e incredulità, N.d.R.).

Il sistema Huang-Meyr è stato sperimentato su una piattaforma commerciale in molte ore di volo con diversi aerei e piloti durante gli ultimi tre anni. Un articolo dettagliato del Prof. Heinrich Meyr, che ha studiato il problema della stima tridimensionale della massa d'aria con profondi dettagli matematici, dovrebbe apparire in un prossimo numero della rivista tedesca *Segelfliegen*.

Come funziona l'Anemoi?

Bachmeier ha sviluppato un filtro di Kalman esteso "non lineare" a 14 dimensioni, allo stesso tempo ma indipendentemente dal lavoro scientifico più recente di Huang e Meyr, e lo ha messo al centro del dispositivo battezzato Anemoi.

I tre ricercatori hanno poi iniziato uno scambio d'idee e il confronto dei risultati. Rispetto agli articoli pubblicati, Anemoi segue un concetto di base leggermente diverso, in quanto non è rivolto a risolvere funzioni variometriche, eliminando così la necessità di un modello aerodinamico (polare, ecc.) per la stima della massa d'aria 3D.

Anche la scelta delle equazioni è sensibilmente diversa, anche se naturalmente dietro c'è la stessa idea di base formulata da Beard e McLain e approfondita da Leutenegger.

TRANSFLUID
Industrial & marine

Bellmarine
powered by Transfluid

Ibrido & Elettrico



Risparmio



Eco Friendly



+ Energia

TRANSFLUID S.p.A.

via G. Rosso, 4 • 21013 Gallarate (VA) Italy • Ph. +39 0331 28421 • info@transfluid.eu • www.transfluid.eu



Diagramma di flusso del Filtro di Kalman

Un filtro di Kalman è essenzialmente un sistema che utilizza equazioni differenziali e dati esterni per simulare un processo reale (in questo caso, i sensori inerziali sono utilizzati in un modello cinetico per rappresentare il percorso e le variazioni di rotta). I risultati della simulazione sono confrontati con la realtà in punti discreti nel tempo (vale a dire ogni volta che sono disponibili nuove misurazioni) e le correzioni sono poi reimmesse nel processo. Il triangolo del vento, di fatto, è usato come modello di misurazione. Dal momento che sia il vettore assoluto al suolo sia la True Airspeed non sono stati solo predetti dal modello, ma sono ora confermati dalle misurazioni, e poiché il dato di "prua simulata" è continuamente ricalcolato, una correzione esatta del terzo vettore - il vettore vento - può sempre essere svolta grazie all'errore verificato sui primi due vettori. Il vettore del vento corretto viene poi utilizzato di nuovo nel processo per predisporre il prossimo "giro" di calcoli cui seguirà la prossima correzione. Anemoi fa questo processo 50 volte al secondo, per concludere il ciclo di calcoli una volta al secondo.

I collaudi degli algoritmi si sono svolti tramite simulazioni su computer, equivalenti a molte centinaia di ore di volo con parametri dei sensori volutamente errati (in maniera verosimile). Il profilo di movimento dei tipici voli in alianti ha dimostrato che l'algoritmo di Anemoi è in grado, utilizzando le informazioni d'asset-

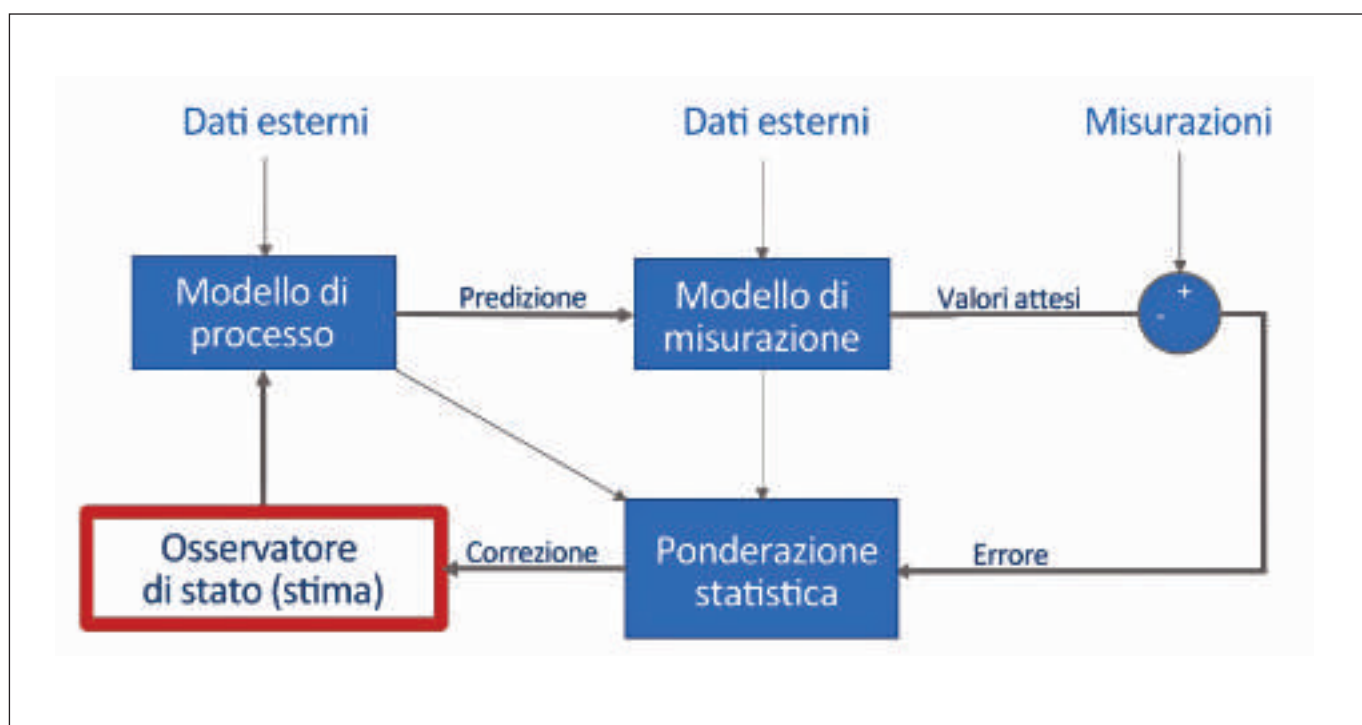
to provenienti dalla piattaforma inerziale (in particolare la rotta), di ridurre la necessità di cambiamenti di rotta fino al punto di azzerare i problemi di osservabilità dei dati nel volo a vela di tutti i giorni, nonostante l'assenza di letture provenienti da una bussola.

Cos'altro può fare il dispositivo?

Per calcolare con precisione il vento, il dispositivo deve determinare in modo permanente la sua posizione tridimensionale e il movimento nello spazio. Questo è il motivo per cui scaturisce un orizzonte artificiale (AHRS) come "sottoprodotto". Poiché sarebbe un peccato buttare via queste informazioni, vengono visualizzate anche sul display (è una funzione disattivabile). Uno sviluppo futuro permetterà di fornire avvisi di stallo, che richiederanno una calibrazione in volo.

Quando sarà disponibile

Il sistema è sviluppato da specialisti della dinamica di volo nel loro tempo libero parallelamente al loro lavoro. La motivazione non è l'interesse commerciale, ma l'opportunità di contribuire con qualcosa di nuovo al volo a vela. Mentre il software e l'hardware del prototipo funzioneranno già nel 2021, Anemoi non è attualmente pronto per la produzione in serie. Si inizierà presto, nella stagione 2021, con i collaudi affidati a piloti sportivi selezionati. Potete seguire la pagina Facebook: "flyanemoi" ■



Rappresentazione dei vari elementi di calcolo che compongono il filtro di Kalman esteso: è matematica applicata ai dati del GPS e dei sensori di assetto. I riquadri non rappresentano circuiti o dispositivi, bensì le diverse parti dell'algoritmo