

deep beam

## WLAN Indoor Positioning: A Look at the Environment

Positioning means to gain awareness, within a certain accuracy, of a mobile device location. It is not a stand alone application, but rather a service that is ground to several applications. Hundreds of research groups worldwide have been developing automated location systems for several decades, for both civilian and military purposes.

To date the standard solution to outdoors positioning is provided by the Global Navigation Satellite Systems (GNSS), that is the GPS and the forthcoming Galileo.

Challenges are different indoors and require micro-detailed geo-referencing to satisfy users' growing needs. To geo referentiate a building is not enough if the position of users inside the building is also relevant to the application. Objects are used as landmarks, and relationships among the objects are crucial for symbolic representation of the whole system. The applications to this scenario are manifold and range from logistics to routing, from personal safety to emergency response.

Unluckily, GNSS do not work properly indoors for the absence of Line Of Sight (LOS) propagation between the satellites and the mobile, such that deep multipath effects randomize the times of arrival of the signals. The impossibility of using satellite systems was already clear in the mid '90s and has driven toward the exploitation of local technologies; consequently, a plethora of choices has been explored. None of them has shown optimal or even sufficient performances in all settings, so the research in this field keeps on gathering much interest inside the Navigation Community.

The main interest has been drawn to 'local technologies', that are non invasive, cheap and under the full control of the provider; in particular, the reuse of technologies already deployed for wireless communication purposes yields a great opportunity. Our choice falls on the Wireless Local Area Network (WLAN) and we adopt, as the relevant parameter to measure, the power propagated between transmitter and receiver; concerning the architecture and the experimental results described in the thesis, we rely on WLAN main example: the standard IEEE 802.11 also named WiFi.

To date even the most sophisticated processing techniques have strong limits: indoors accuracies tighter than 2 meters are achieved only in very peculiar conditions and after heavy training stages. The reason lies in the environment, that is not only difficult to understand but also changes rapidly. Our aim is

to exploit several issues about the environment that are typically neglected by classic algorithms in order to improve the positioning accuracy. To do this, we use Bayesian techniques, borrowed from Probability Theory that represent elegant and powerful tools for signal processing and data fusion.

We study three cases of interest, different but strongly correlated, and for each of them we follow broadly the same flow: theory, implementation, simulations, experiments.

In the first scenario we relax the hypothesis of perfect knowledge of the environment, since yet the eldest studies about indoor localization put in evidence the need to catch the environmental most relevant changes; we approach the problem by means of two different Bayesian adaptive algorithms. As a second case study we admit in the localization algorithm also those receivers whose positions are not known; this problem has been recently proposed under the name colocalization, and in the thesis is undertaken by means of a Rao Blackwellized Particle Filter. The last scenario concerns the employment of the building map as basically a set of constraints cast on the estimator. This is done by means of a Bayesian Simultaneous Localization And Mapping algorithm and accounts also for the (unsynchronized) fusion with other sensors, e.g. in the thesis a foot mounted - Inertial Measurement Unit providing step measurements.

Even though our results validate the algorithms proposed, we would like to stress that our main scientific contribution is the theoretical framework itself, which matches the flexibility of Bayesian Theory with the practical issues typical of WLAN indoor positioning.

## ***WLAN Indoor Positioning: A Look at the Environment***

Il lavoro, svolto durante il Corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Informazione, trova il suo filo conduttore nella ricerca di metodi innovativi per la localizzazione di un utente in un ambiente *indoor*, quali un edificio oppure, per certi versi, un *canyon* urbano. L'interesse riscosso, sia nel mondo accademico, sia nell'industria, è legato alle possibilità da un lato di fornire all'utente una vasta gamma di servizi *location based*, dall'altro di garantire politiche di sicurezza.

In tal caso è ben noto come le soluzioni inerenti sistemi satellitari (GPS, Galileo, ..) siano fallaci: se infatti in ambienti *outdoor* si raggiungono errori sulla posizione dell'utente inferiori al metro, nel caso *indoor* l'attenuazione da ostacoli può 'accecare' i ricevitori e, in ogni caso, il fenomeno del multipath è causa di errori di decine di metri, e dunque dell'ordine di grandezza dell'ambiente stesso. Pertanto, tecnologie alternative, economiche e facilmente accessibili si rendono necessarie. Tra queste una delle più interessanti è la tecnologia WLAN, il cui standard di riferimento IEEE 802.11 (WiFi) è diffuso ormai in maniera capillare e i suoi ricevitori, piccoli, affidabili ed economici, sono integrati in molti prodotti informatici di uso comune, come laptop e smart phones. In dettaglio l'uso delle misure di ampiezza del segnale wireless (RSS) permette di evitare ulteriori aggiunte hardware. La difficoltà, però, nel modellare il canale di comunicazione, per esempio in termini di attenuazione e multipath, insieme alla mancata conoscenza a priori di parametri deterministici delle tecnologie utilizzate rendono complicato l'obiettivo preposto.

La linea di pensiero che ha guidato questo lavoro è basata sull'uso iniziale dei modelli più semplici possibili, da cui partire per individuare e tener conto singolarmente di altre forme di incertezza. Ne sono dunque seguiti svariati scenari operativi, affrontati mediante tecniche probabilistiche tipiche del signal processing, con particolare predilezione verso la stima Bayesiana.

### *Parametri di propagazione*

Partendo da modelli della propagazione e dell'errore di misura molto semplici (path loss di base nel primo caso, rumore additivo Gaussiano oppure di Rice nel secondo), la prima complicazione introdotta è stata l'incertezza sulla potenza emessa dai trasmettitori (*Access Points* – AP). Tale quantità è molto variabile, sia per differenti AP, sia nel tempo, ed ha un grande impatto sulla localizzazione. E' di interesse anche la stima dell'esponente di propagazione che è pari a 2 nel caso ideale di onda sferica che viaggia nello spazio libero ma che può variare anche del 100% in ambienti reali.

In uno scenario Bayesiano, il filtro di Kalman e svariati tipi di Particle Filters sono stati adattati alla stima sequenziale congiunta, sia della posizione dell'utente, sia dei suddetti parametri. Anche la varianza del rumore di misura nel caso Gaussiano è stata presa in considerazione in maniera simile. I risultati simulativi e sperimentali mostrano un miglioramento delle prestazioni in caso di stima della potenza emessa. L'aggiunta degli altri parametri verifica invece l'insorgenza di problemi di identificabilità, alleviati in casi specifici ma non risolti in linea generale. Un ulteriore studio è stato proposto a riguardo della presenza di ostacoli temporanei, trattati come causa di fluttuazioni spaziali della potenza emessa.

Le prestazioni ottenute sono state confrontate con la versione sequenziale del Limite di Cramer-Rao a Posteriori, opportunamente modificato e dunque valutato nella maggior parte degli scenari di stima e per entrambi i modelli di misura.

### *Simultaneous Localization And Mapping (SLAM)*

La conoscenza della mappa dell'edificio è determinante nel ridurre gli errori: essa si esplica come un sistema di vincoli aggiuntivi atti a correggere lo stimatore della posizione o della traiettoria dell'utente. In più, in un sistema basato su WLAN la posizione degli AP è assunta nota con assoluta precisione altrimenti tutte le tecniche falliscono. Laddove non sia possibile o conveniente usare questa conoscenza, è di interesse il paradigma SLAM in cui è affrontata la stima congiunta della posizione dell'utente e della mappa, intesa come una varietà di informazioni sull'ambiente.

Il primo scenario di SLAM esplorato poggia solo su misure da rete WLAN. In letteratura si dimostra la convergenza dello SLAM in un caso estremo in cui nessuna informazione sugli AP è nota, ma severi vincoli sul movimento dell'utente sono imposti. In questo lavoro, invece, alcuni AP sono ritenuti in posizioni note ma nessun vincolo viene posto sul movimento dell'utente. Adoperando la stima Bayesiana e un'architettura a due filtri sequenziali, si propongono e si testano sperimentalmente due algoritmi che fissano in punti differenti il trade off tra accuratezza e complessità.

L'ultimo scenario prevede la fusione di misure RSS con dati odometrici provenienti da una *Inertial Measurement Unit* (IMU), ed è stato sviluppato in collaborazione con l'Istituto di Comunicazioni e Navigazione dell'Agenzia Aerospaziale Tedesca (DLR). Il punto di partenza è stato l'algoritmo FootSLAM che effettua lo SLAM in un ambiente del tutto ignoto, solo mediante dati odometrici. Il suo cuore è un Particle Filter (più precisamente il SIR) in cui lo stato è rappresentato da una ipotesi della traiettoria dell'utente e della mappa dell'edificio. Quest'ultima viene lentamente costruita in maniera frequentistica, e perciò la sua convergenza necessita di molti passaggi per gli stessi punti da parte dell'utente.

Le misure da WLAN entrano in gioco per garantire un rapido incremento nella convergenza dell'algoritmo a fronte di una variazione insignificante della complessità. Formalmente il problema viene affrontato in termini Bayesiani, al fine di includere nella mappa da stimare la distribuzione di probabilità della posizione degli AP rilevati e della loro potenza emessa, da raffinare ad ogni nuova misura.

L'idea alla base dell'algoritmo proposto, chiamato WiSLAM, è che in ogni *particle* si ipotizza una possibile traiettoria a partire dai dati odometrici. Questa permette di mappare gli AP in termini della distribuzione di probabilità della loro posizione e potenza emessa. Le verosimiglianze delle successive misure di segnale si sovrapporranno a tale distribuzione in maniera migliore o peggiore a seconda della bontà dell'ipotesi di partenza. Il motivo per cui i *particle* più 'vicini' alla realtà sono distinguibili rispetto agli altri è meglio comprensibile in termini di teoria dell'informazione: infatti si è trovato sperimentalmente che essi presentano una minore entropia (distribuzioni a posteriori più concentrate) rispetto agli altri.

Bisogna notare che il WiSLAM non richiede all'utente di percorrere dei circuiti chiusi e pertanto la convergenza ne risulta velocizzata, per cui il suo campo di applicabilità si amplia notevolmente, come mostrato da esperimenti su dati reali.

Infine, molta attenzione è stata posta alla complessità computazionale dell'algoritmo: alcune approssimazioni e le conseguenti modifiche nell'algoritmo hanno ridotto la sua complessità fino ad essere trascurabile, a fronte di prestazioni quasi invariate.