

Riassunto

Nonostante i processi batch siano relativamente semplici da configurare e da gestire anche con un livello limitato di automazione e una conoscenza ridotta dei meccanismi che ne stanno alla base, spesso è difficile assicurare una qualità del prodotto finito riproducibile ed elevata. La strumentazione comunemente utilizzata nella pratica industriale riesce solo raramente a fornire misure in tempo reale della qualità di un prodotto. Inoltre, molte complicazioni nascono dalla natura multivariata della qualità, la quale dipende da una serie di parametri fisici, operativi o addirittura soggettivi. Sebbene le informazioni sulla qualità del prodotto non siano facilmente accessibili, esse sono racchiuse nelle variabili di processo abitualmente registrate dai calcolatori di processo e memorizzate in banche di dati storici. I metodi statistici multivariati permettono di ridurre la dimensione del problema proiettando le variabili di processo in uno spazio di dimensioni ridotte costituito di variabili fittizie che sono in grado di mantenere tutto il contenuto informativo sulla qualità, superando i problemi del rumore di misura delle variabili, della ridondanza e dell'elevato grado di correlazione. Inoltre, questi metodi sono in grado di trattare dati anomali o dati mancanti.

Lo scopo di questa Tesi di Dottorato è di sviluppare dei sistemi innovativi per il monitoraggio della qualità di prodotti dall'alto valore aggiunto mediante tecniche statistiche multivariate. In particolare, i contributi scientifici di questo progetto di Dottorato sono:

- l'elaborazione di tecniche per lo sviluppo di sensori virtuali per la stima in tempo reale della qualità del prodotto in sistemi produttivi di tipo batch;
- l'applicazione non convenzionale di tecniche di proiezione su sottospazi latenti al fine di prevedere la durata di un batch o delle relative fasi operative;
- lo sviluppo di metodiche innovative per il monitoraggio multirisoluzione e multivariato della qualità mediante l'analisi di immagini di un prodotto dall'alto valore aggiunto.

Innanzitutto, in questa Tesi vengono proposti sensori virtuali per la stima in linea della qualità del prodotto. Essi sono stati sviluppati e implementati prendendo in considerazione il caso di studio un processo industriale reale per la produzione di resine mediante polimerizzazione batch. I sensori virtuali proposti sono basati sulla tecnica statistica multivariate della proiezione su strutture latenti (PLS), che opera una regressione delle misure di processo usualmente disponibili in linea in tempo reale. Questo sistema riesce a garantire una accuratezza delle stime della qualità che è dello stesso ordine di grandezza delle misure di qualità fatte in laboratorio, col vantaggio che le stime in linea sono disponibili con altissima frequenza (sull'ordine di grandezza di s^{-1}), cioè una frequenza centinaia di volte superiore delle misure che possono essere fatte in laboratorio (sull'ordine di grandezza di h^{-1}). Inoltre, le stime sono accessibili in tempo reale e senza il ritardo che è tipico delle misure di laboratorio.

Al fine di compensare le non linearità dei dati e i cambiamenti nella struttura di correlazione fra le variabili, la procedura adottata divide il batch in una sequenza di un numero limitato di fasi di stima, all'interno delle quali lo stimatore virtuale è in grado di dare stime molto accurate per mezzo di modelli PLS lineari. Il passaggio da una fase a quella successiva avviene in corrispondenza di alcuni "eventi" facilmente riconoscibili nelle stesse variabili di processo. La caratteristica principale del sensore virtuale proposto è che esso tiene conto di informazioni sulla dinamica del processo per mezzo di modelli a "variabili ritardate" (i quali aggiungono informazioni sulla dinamica del processo da valori passati delle variabili di processo) o modelli a media mobile. Il filtro a media mobile aggiunge una "memoria temporale" al sensore virtuale che migliora l'accuratezza di stima e, mediando le variabili di processo all'interno di una finestra temporale di dimensione fissata, riesce ad eliminare il rumore di misura, attenuare il rumore di processo, appiattire valori anomali e compensare l'effetto di temporanee mancanze di dati. L'ampiezza della finestra deve comunque essere scelta con cautela, dato che una finestra temporale troppo larga potrebbe ritardare gli allarmi sull'attendibilità della stima. Da un punto di vista operativo, il sistema proposto aiuta il personale che opera nell'impianto a rilevare delle derive sulla qualità del prodotto, suggerisce tempestivamente le correzioni da apportare alla ricetta del processo, e aiuta a minimizzare i fuori specifica del prodotto finale. Inoltre, il numero di campioni per la misura della qualità in laboratorio può essere ridotto drasticamente, la qual cosa determina un guadagno sia sul tempo totale del batch, sia sui costi relativi al laboratorio che alla manodopera e alla sua organizzazione.

Anche una seconda tipologia di sensori virtuali è stata sviluppata per assistere il monitoraggio in linea della qualità del prodotto e per fornire informazioni utili per una programmazione efficace della produzione: un sensore virtuale per la previsione in tempo reale della durata del batch. Questa strategia di monitoraggio si basa su modelli PLS evolutivi che sfruttano le informazioni progressivamente raccolte nel tempo durante il batch per prevedere la durata del batch o di ciascuno dei relativi stadi operativi. Anche l'accuratezza ottenuta dalle previsioni ottenute con questo sensore virtuale è del tutto soddisfacente, dato che l'errore di previsione è molto inferiore sia alla variabilità delle durata del batch che alla durata dei turni di lavoro degli operatori. Inoltre, la parte iniziale del batch conferma di essere di importanza fondamentale per la durata, in quanto le condizioni iniziali delle attrezzature, lo stato delle materie prime, e la fase di riscaldamento iniziale del reattore esercitano una grandissima influenza sulle prestazioni del batch stesso. Le informazioni che si ricavano sulla durata con grande anticipo rispetto alla fine del batch permettono una migliore organizzazione degli interventi sull'impianto, degli operatori d'impianto e dell'utilizzazione delle apparecchiature. L'efficacia dei sensori per la stima della qualità e per la previsione della durata del batch è stata verificata applicandoli ed implementandoli in linea nel caso della produzione di resine mediante polimerizzazione batch.

Infine, i metodi statistici multivariati sono stati utilizzati anche nel campo dell'analisi dell'immagine. Abitualmente, nella pratica industriale, le ispezioni di un prodotto mediante analisi dell'immagine vengono svolte con semplici misurazioni dei più importanti parametri fisici opportunamente messi in evidenza per mezzo di tecniche di filtrazione. Inoltre, queste misure vengono ottenute in modo non sistematico. Molte informazioni utili restano però "nascoste" nelle immagini. Queste permettono di identificare la natura complessa della qualità del prodotto finale. Per questo è stato sviluppato un sistema totalmente automatizzato per il monitoraggio in tempo reale da immagini di un manufatto dall'alto valore aggiunto. Questo sistema di monitoraggio basato su tecniche multirisoluzione e multivariate è stato applicato al caso della caratterizzazione della superficie di un semiconduttore dopo fotolitografia, un'operazione fra le più importanti nella fabbricazione di circuiti integrati. Tecniche avanzate di analisi multivariata dell'immagine estraggono le tracce che il processo lascia sul prodotto, aiutando sia il rilevamento di situazioni critiche nel processo che l'intervento con azioni correttive a neutralizzare eventuali problemi. L'approccio proposto in questa Tesi si basa su un filtraggio preliminare multirisoluzione dell'immagine mediante wavelet, seguito da uno schema di monitoraggio che conduce in parallelo un'analisi della rugosità superficiale e della forma della superficie di un prodotto. Ad esempio, la rugosità della superficie può essere esaminata con una analisi delle componenti principali "nidificata". Questa è una strategia che si articola su due differenti livelli: il livello esterno che permette di discriminare parti differenti della superficie per mezzo di una analisi dei gruppi con PCA; il livello interno esegue il monitoraggio della rugosità superficiale con PCA. La forma della superficie viene analizzata per mezzo di un approccio PCA a "finestra mobile nello spazio", il quale coglie l'informazione dell'immagine secondo il relativo ordine nello spazio e riesce anche a tener conto sia delle non linearità che delle differenze strutturali della superficie. Questo sistema è in grado di rilevare alcune delle caratteristiche qualitative del prodotto che abitualmente non sono accessibili senza richiedere l'intervento dell'uomo. Inoltre, il monitoraggio risulta essere veloce, attendibile e non ambiguo, ed esegue una scansione di un'immagine del prodotto localizzando in modo preciso difetti e anomalie e rilevando eventuali derive del processo.

In conclusione, nonostante le metodologie proposte siano state testate su specifici casi di studio, esse hanno dimostrato di essere generali e vantano un grande potenziale. Per questo si ritiene sia possibile estenderle a differenti campi di ricerca e a diverse applicazioni industriali (ad esempio: ingegneria alimentare; industria farmaceutica; biotecnologie; etc...), nonché a differenti scale di indagine, dalla scala macroscopica alla microscopica o nanoscopica.

