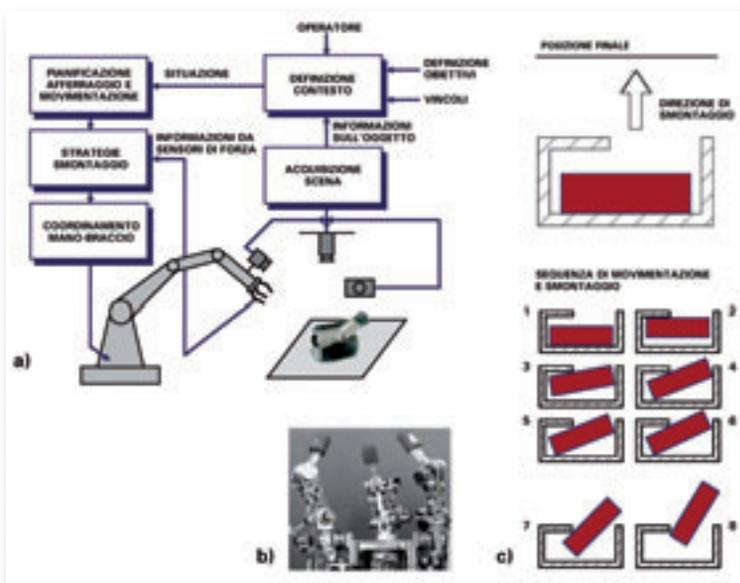


Sistemi per il **disassemblaggio** di apparecchiature



1. Uno dei primi esempi di sistemi di disassemblaggio, è costituito da un sistema (figura 1a) basato su un robot a 6 assi con manipolatore a 3 dita per l'afferraggio (figura 1b). Il sistema integra delle procedure di identificazione delle condizioni di ostruzione che si presentano nello smontaggio, e di risoluzione mediante la generazione di piccoli movimenti in sovrapposizione ai movimenti inizialmente programmati, fino all'uscita dalla condizione di bloccaggio (figura 1c).

La criticità ambientale dovuta allo smaltimento di apparecchiature elettriche ed elettroniche a fine vita, è ancora più rilevante se si considera che più del 90% dei Raee sono conferiti in discarica o inceneriti senza un trattamento adeguato.

Per ovviare al problema, varie iniziative sono state promosse per spingere i produttori verso un approccio integrato per lo sviluppo e la gestione di questi prodotti nel rispetto dell'ambiente, introducendo una vi-

sione del problema estesa al loro intero ciclo di vita, e ponendo particolare attenzione sulla fase di dismissione a fine utilizzo. In quest'ottica è nata la direttiva comunitaria 2002/96/EC, attuata in Italia mediante il DL 25 luglio 2005 n. 151, che promuove l'estensione della responsabilità dei produttori di Aee alle fasi di fine vita [EC2002/96, 2003].

Poiché il riciclaggio e il recupero sono stati posti al centro dell'attenzione, nella chiara

A causa della elevata pressione dovuta ai fenomeni di obsolescenza, la produzione di rifiuti derivanti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) è caratterizzata da un elevato tasso di crescita.

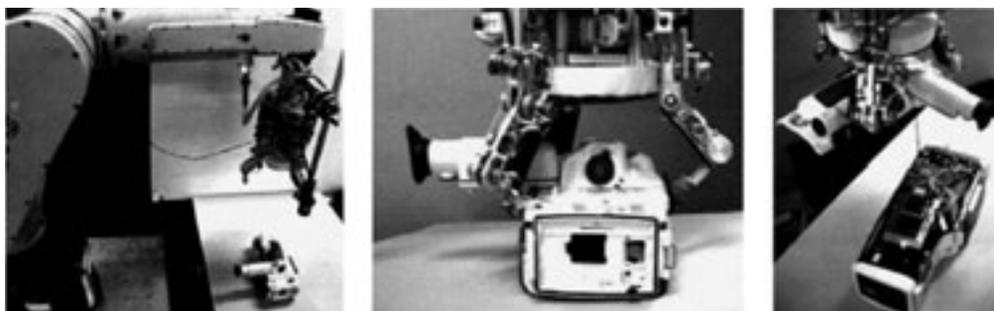
Nell'ambito

della Comunità Europea

è stato stimato pari al 3-5% annuo, tre volte più veloce del tasso di crescita

medio dell'intero

comparto rifiuti



2. Sperimentazione su una videocamera di vecchia generazione prevedendo la rimozione del case esterno e dei componenti di maggiore volume, la disconnessione di giunzioni per estrarre le schede, la manipolazione dei cavi.

prospettiva di obbligare i produttori a farne carico, fissando delle soglie minime espresse in percentuali del peso totale dei prodotti dismessi, le comunità scientifica e industriale stanno indagando la possibilità di rendere economicamente sostenibili, se non proficui, questi interventi. Tra i vari aspetti presi in esame, il disassemblaggio dei prodotti, esplicitamente auspicato dalla direttiva citata, e in particolare lo sviluppo di sistemi di disassemblaggio, hanno assunto un ruolo di particolare rilievo.

Il disassemblaggio, definito come la rimozione delle parti desiderate da un assemblato, con la condizione che non si verifichi alcun danneggiamento delle parti dovuto allo stesso smontaggio [Brennan et al., 1994], è un'operazione costituita da un insieme di attività pianificate nel tempo, ed è essenziale ai fini delle strategie ambientali a fine utilizzo, poiché può consentire vari tipi di interventi: recupero di componenti riutilizza-

bili; recupero di materiali riciclabili; rimozione di materiali pericolosi o tossici. Questa sua definizione di base può essere estesa, prevedendo la possibilità di operare smontaggi anche distruttivi (ove la destinazione finale della frazione recuperata lo consenta), in modo da contenere tempi e costi di smontaggio, a tutto beneficio della sostenibilità economica di tali interventi.

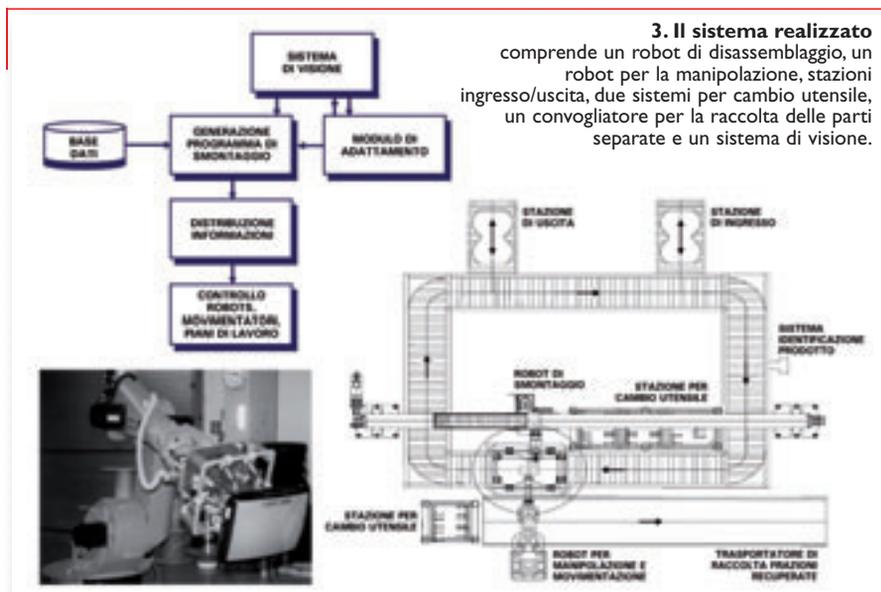
La progettazione dei sistemi di disassemblaggio

Una progettazione efficiente dei sistemi di disassemblaggio deve tenere conto di alcune caratteristiche determinanti del prodotto da smontare: caratteristiche costruttive (complessità dell'architettura, tipologie delle giunzioni, profondità di smontaggio in relazione agli obiettivi da smontare); opportunità di recupero a fine vita (durata dei componenti, riciclabilità dei materiali). Da queste caratte-

ristiche dipendono le tipologie di processi di disassemblaggio da operare (smontaggio selettivo o completo, in serie o in parallelo), la profondità di smontaggio da raggiungere, le sequenze di smontaggio, e quindi le procedure e operazioni dettagliate che dovranno essere eseguite dal sistema di disassemblaggio, oltre che le tipologie di strumentazioni che devono concretamente operare lo smontaggio (robot e manipolatori, attrezzi per la rimozione delle giunzioni, supporti alla movimentazione).

Tali caratteristiche del prodotto determinano quindi le funzionalità richieste ai sistemi di disassemblaggio, e devono guidare il progettista nel definire le principali proprietà del sistema, che possono variare secondo una ampia gamma di alternative:

- il livello di automazione (incidenza delle operazioni manuali, tecnologie automatiche o semiautomatiche utilizzate);
- il livello di flessibilità (il sistema è dedicato a una tipologia di prodotto più o meno ristretta, è sufficientemente flessibile da operare su prodotti diversificati);
- come il sistema gestisce l'importante questione della pianificazione della sequenza di smontaggio (trascura la questione e smonta in maniera arbitraria, attinge le informazioni sulle sequenze di smontaggio da una fonte esterna, include un apposito modulo di Disassembly Sequencing and Planning);
- come il sistema si rapporta alle caratteristiche costruttive dei prodotti da smontare (le rileva automaticamente e direttamente sul prodotto, riconosce il prodotto e associa informazioni sulle caratteristiche costruttive precedentemente raccolte, le acquisisce di volta in volta da fonti esterne);
- come il sistema si rapporta alle varie po-



tenzialità che il prodotto presenta a fine vita (tiene conto delle diverse opzioni di recupero dei vari componenti, in funzione di alcune proprietà come il valore economico, la tossicità, la riciclabilità dei materiali, lo stato fisico dei prodotti a fine vita, oppure smonta ciò che gli viene indicato dall'operatore, o ancora è predisposto in funzione di uno specifico scenario prestabilito di dismissione a fine vita).

Esempi di sistemi di disassemblaggio

Varie esperienze sono state fatte e sono tuttora in corso allo scopo di realizzare sistemi di disassemblaggio sperimentali, prevalentemente automatizzati, e indagare in concreto le questioni sollevate. Si riportano a seguire alcuni esempi concepiti per il trattamento dei Raee, che descrivono l'evoluzione delle esperienze in questo specifico settore.

Uno dei primi esempi significativi, realizzato presso la Darmstadt University of Technology [Weigl, 1994], è costituito da un sistema (figura 1a) basato su un robot a 6 assi con manipolatore a 3 dita per l'afferraggio (figura 1b). Il sistema integra delle procedure di identificazione delle condizioni di ostruzione che si presentano nello smontaggio, e di risoluzione mediante la generazione di piccoli movimenti in sovrapposizione ai movimenti inizialmente programmati, fino all'uscita dalla condizione di bloccaggio (figura 1c). Questa operazione viene guidata da sensori che misurano la resistenza al movimento, e una camera CCD per la localizzazione delle parti da estrarre.

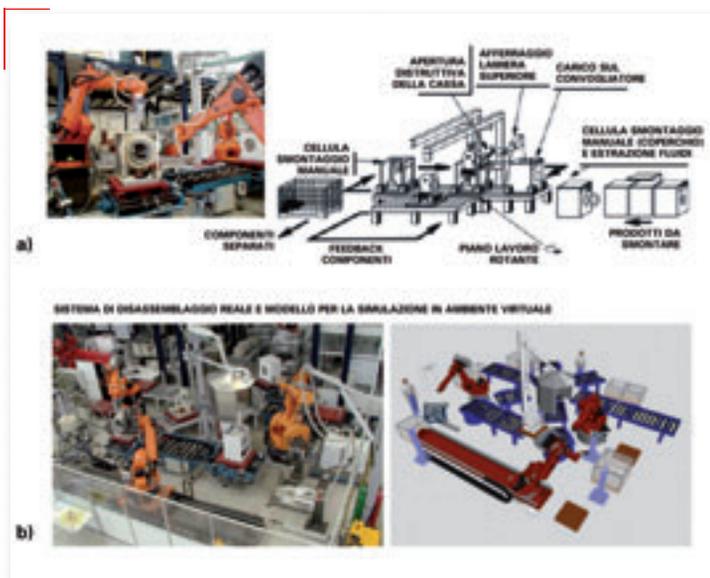
La sperimentazione è stata fatta su una videocamera di vecchia generazione (figura 2), prevedendo la rimozione del case esterno e dei componenti di maggiore volume, la disconnessione di giunzioni per estrarre le schede, la manipolazione dei cavi.

Successivamente il sistema è stato arricchito con un modulo per il controllo delle sequenze di disassemblaggio, che distingue oggetti attivi (cioè componenti che hanno caratteristiche di funzionalità/connettività), da oggetti passivi (quelli obiettivo del disassemblaggio) [Weigl-Seitz et al., 2006].

Il sistema realizzato dalla Prielog Logistik con la Brandenburg Technical University (fi-

4. Sistema per il disassemblaggio di elettrodomestici: sperimentazione su una lavatrice (figura 4a).

Successivamente il sistema è stato arricchito di un controllo adattativo, basato su supporti informatici per lo sviluppo e il controllo delle sequenze di smontaggio in ambiente virtuale (figura 4b).



gura 3), comprende un robot di disassemblaggio, un robot per la manipolazione, stazioni ingresso/uscita, due sistemi per cambio utensile, un convogliatore per la raccolta delle parti separate e un sistema di visione [Scholz-Reiter et al., 1999].

I prodotti trattati sono principalmente televisori e monitor dai quali vengono prelevati i tubi catodici, le schede stampate e i cavi.

Il sistema è in grado di recuperare questi elementi in un tempo di 5-7 minuti, tenendo conto del grado di incertezza sullo stato dei componenti. Ciò è reso possibile da un apposito modulo di adattamento, che permette di adeguare il processo di disassemblaggio allo stato dei prodotti da trattare, attingendo informazioni da due basi dati: il modello dati statici contiene le caratteristiche del prodotto da trattare, del sistema di disassemblaggio e dei processi di smontaggio preliminarmente previsti; il modello dati dinamici contempla la possibile casistica di eventi dovuti a incertezze sullo stato del prodotto e sul risultato di ogni operazione di disassemblaggio, il cui verificarsi viene rilevato mediante un sistema di visione che aggiorna il modello dinamico, permettendo al modulo di adattamento di intervenire correttivamente sul modulo di generazione del processo di disassemblaggio.

Particolarmente evoluto è il sistema automatizzato per il disassemblaggio di elettrodomestici in fase di sviluppo presso la Technical University of Berlino, costituito da una

combinazione di celle di disassemblaggio manuale e robotizzato [Uhlmann et al., 2001]. Le prime sperimentazioni sono state condotte su una lavatrice (figura 4a), operando manualmente la rimozione del coperchio e dell'oblò, e proseguendo lo smontaggio mediante un robot per il taglio al plasma e utensili perforanti per la rimozione distruttiva delle giunzioni, in modo da consentire l'estrazione del motore elettrico (il componente di maggiore valore), e dei circuiti stampati (per i quali è stato predisposto un apposito manipolatore).

Inizialmente carente di qualsiasi supporto per la pianificazione e la gestione del processo di disassemblaggio, il sistema è stato successivamente arricchito di un controllo adattativo [Kim et al., 2006], basato su supporti informatici per lo sviluppo e il controllo delle sequenze di smontaggio in ambiente virtuale (figura 4b), che ne incrementa affidabilità e flessibilità, nella prospettiva di consentire l'impiego per il disassemblaggio di una ampia varietà di elettrodomestici bianchi.

Osservazioni e prospettive di sviluppo

Da un'ampia indagine svolta sulle esperienze di sviluppo di sistemi di disassemblaggio, è stata rilevata l'importanza della questione relativa al livello di automazione da implementare a supporto dello svolgimento delle operazioni di smontaggio.

Il disassemblaggio automatizzato il più delle volte non consente uno smontaggio completo, soprattutto per prodotti complessi. Tuttavia esso permette di comprimere notevolmente i tempi operativi.

In più, prevedendo volumi da processare sufficientemente ampi, i costi di disassemblaggio tendono a attestarsi su livelli più contenuti rispetto a quelli che incorrono nel caso del disassemblaggio manuale, su cui pesa una maggiore incidenza dei costi di manodopera.

La rapida crescita dei volumi di Racc incoraggia dunque le soluzioni automatizzate. Per tale motivo la maggiore parte dei sistemi pilota sviluppati in via sperimentale sono caratterizzati da elevati livelli di automazione. Essi però risultano poco flessibili in quanto sono dedicati generalmente al disassemblaggio di una sola categoria di prodotti, se non di uno specifico componente.

Questo li rende poco efficienti dal punto di vista economico, poiché un processo di disassemblaggio automatizzato è sostenibile quando le celle operative sono sufficientemente flessibili da poter funzionare in modo continuo.

Poiché i Racc sono costituiti da un'ampia varietà di prodotti e modelli, in assenza di una rete organizzata (collettiva o privata) di sistemi di raccolta, il volume da processare di uno specifico modello risulta insufficiente per garantire continuità operativa al sistema. Questo aspetto, accentuato dalla diversità delle durate di vita utile, rende gli Racc a fine vita intrinsecamente poco adatti al disassemblaggio automatizzato.

Per far fronte a questa peculiarità è necessario che il sistema di disassemblaggio possa operare su una varietà di modelli e prodotti. In base a questa osservazione, è opportuno delineare alcuni accorgimenti particolarmente significativi che possono guidare lo sviluppo di sistemi di disassemblaggio automatizzati per Racc, sufficientemente efficienti da giustificare l'investimento economico che richiedono:

- i sistemi devono essere modulari in modo che possano essere combinati e adattati in relazione alle necessità di intervento su famiglie di prodotti;
- i manipolatori e gli altri attrezzi di smon-

taggio devono essere intercambiabili in modo da poter essere impiegati da stesse stazioni robotizzate e devono essere in grado di lavorare e manipolare componenti con caratteristiche geometriche diversificate;

- i sistemi di visione e riconoscimento devono essere in grado di rilevare e localizzare con affidabilità le forme e le posizioni di componenti e giunzioni, soprattutto nel caso di disassemblaggio non distruttivo, che richiede maggiore precisione;

- il controllo deve essere adattativo, in grado di fare fronte sia alle diversità che caratterizzano le proprietà dei componenti da processare, sia a eventuali imprevisti che possono incorrere nello stesso processo di disassemblaggio;

- i sistemi devono essere dotati di moduli per la generazione in tempo reale delle sequenze di disassemblaggio, e per il controllo della loro esecuzione.

Si conclude osservando come le difficoltà intrinseche che i Racc presentano di fronte al disassemblaggio, soprattutto se automatizzato, possono essere contenute ricorrendo allo sviluppo di metodi per il raggruppamento dei prodotti in base ad affinità relative non solo ai possibili scenari di recupero e dismissione a fine vita, ma anche alle caratteristiche co-

struttive [Viswanathan e Allada, 1999].

Un intervento più radicale, da operare preventivamente, consiste invece nel progettare i prodotti per essere predisposti agli interventi di smontaggio a fine vita.

La codifica dei componenti in funzione dei sistemi di visione e controllo dello smontaggio automatico, la standardizzazione degli elementi di giunzione e delle geometrie dei componenti, la pianificazione preventiva delle sequenze di disassemblaggio, solo per citarne alcuni, sono accorgimenti che possono contribuire in maniera sostanziale alla sostenibilità economica dello smontaggio.

Ciò evidenzia la necessità di un approccio integrato al disassemblaggio dei prodotti, che valorizzi la stretta relazione tra: caratteristiche costruttive dei prodotti e loro progettazione funzionale al disassemblaggio; pianificazione delle sequenze di smontaggio; progettazione dei sistemi di disassemblaggio.

F. Giudice, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Facoltà di Ingegneria, Università di Catania, fgiudice@diim.unict.it
M. Kassem, Dipartimento di Meccanica, Facoltà di Ingegneria, Università Politecnica delle Marche, kassem@virgilio.it

Bibliografia

- Brennan L., Gupta S. M., Taleb K. N. (1994), Operations planning issues in an assembly/disassembly environment. *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 14, pp. 57-67.
- EC2002/96 (2003), Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Official Journal of the European Communities*, L 37, 13/2/2003, pp. 24-38.
- Kim H.-J., Ciupek M., Buchholz A., Seliger G. (2006), Adaptive disassembly sequence control by using product and system information. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 22, pp. 267-278.
- Scholz-Reiter B., Scharke H., Hucht A. (1999), Flexible robot-based disassembly cell for obsolete TV-sets and monitors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 15, pp. 247-255.
- Uhlmann E., Seliger G., Härtwig J., Keil T. (2001), Pilot disassembly system. *Annals of the German Academic Society for Production Engineering, Production Engineering VIII*, pp. 83-88.
- Viswanathan S., Allada V. (1999), A framework for the flexible grouping of products for disassembly. *Journal of Electronics Manufacturing*, Vol. 9(1), pp. 53-66.
- Weigl A. (1994), Requirements for robot assisted disassembly of not appropriately designed electronic products: Lessons from first studies. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, San Francisco*, pp. 337-342.
- Weigl-Seitz A., Hohm K., Seitz M., Tolle H. (2006), On strategies and solutions for automated disassembly of electronic devices. *International Journal for Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 30, pp. 561-573.