



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

MORPHING IN AERONAUTICA

Professore:
Carlo De Nicola

Allievi:
Riccardo Iuffredo M53/1172
Mariapina Lauriola M53/1274

Anno Accademico 2020/2021

INDICAZIONI PER LO SVILUPPO DELLE ESERCITAZIONI A CASA

Il rispetto di queste indicazioni è tassativo. In presenza di difformità non prenderò in considerazione le relazioni. Ogni cosa riportata va letta con molta attenzione prima di essere sottoposta alla mia attenzione: non conviene 'usare' un docente come correttore di bozze.

STESURA DEL TESTO (CON O SENZA WORD PROCESSOR). È richiesta un'esposizione strutturata piuttosto che narrativa. Pertanto, descrivete sinteticamente ed in sequenza

- lo scopo
- lo sviluppo
- l'applicazione
- le conclusioni

indicando gli strumenti (tecnici, informatici o scientifici) utilizzati per lo sviluppo e la stesura. È vietato riprodurre, anche in parte, la teoria alla base dell'esercizio: limitatevi all'indicazione bibliografica. La lunghezza, in facciate, del corpo del resoconto del lavoro a casa (escludendo quindi titolo, indice e lista dei simboli) va contenuta al massimo.

INDICAZIONI PARTICOLARI. Il fascicolo che contiene gli esercizi deve essere curato, preciso, elegante, e pertanto

- i risultati numerici vanno riportati con la giusta accuratezza, ponendo ESTREMA attenzione all'aspetto delle cifre significative
- ogni rappresentazione grafica deve essere pertinente
- riportate sempre il sommario dei risultati in quadri sinottici od in opportuni grafici
- **FIGURE/DIAGRAMMI.** Tutto in bianco, nero e toni di grigio (immagini e foto riprese da sorgenti bibliografiche, compresa la rete, potranno essere a colori). Inserite nel testo, numerando e spaziando per bene, nel rispetto e con indicazione delle scale, con una legenda esauriente (=con tutte le indicazioni), senza sovrapporre la legenda ai grafici, con simboli adeguatamente grandi. Il formato deve essere umano e l'assetto verticale. Ogni risultato va commentato (nel testo od anche in didascalia). Il Cd (CD) va indicato in Drag Count e parte sempre da zero (e lo stesso vale per la resistenza). Le polari devono essere ingrandite nelle regioni di bassa resistenza.
- il disegno del profilo: **LE SCALE (!)**, riportate una figura clean della larghezza utile della pagina, il tratto deve essere "corretto"
- evitate per quanto possibile termini in lingua diversa dall'italiano (un termine irrinunciabile di altra lingua va scritto in corsivo), evitando tout court versioni italianizzate di termini di altre lingue
- nella stesura informatica lasciate uno spazio bianco dopo i caratteri .,:?;!; in stampa lasciare 3.5 cm a sx, 2 cm a dx
- eventuali formule vanno numerate
- non è necessaria (ma può essere utile) la lista dei simboli
- impiegate sempre la terminologia più appropriata
- state attenti ad evitare il costrutto ": (due punti) seguito da una figura o da una tabella"
- **CFD.** Le scale in toni di grigio; congruità dei confronti con Xfoil: parità di Cl, rispetto dei limiti di validità
- Scrivete (e dite!) sempre "numero di Mach/Reynolds" e non "Mach/Reynolds"

PRESENTAZIONE. Esercizi ed elaborati vanno presentati in un fascicolo non rilegato, indicando in copertina soltanto cognome, nome e matricola, insieme all'elenco di tutti gli esercizi in sviluppo o già convalidati, e riportando in seconda pagina queste INDICAZIONI PER LO SVILUPPO DELLE ESERCITAZIONI A CASA. La forma è da me valutata in modo paritetico rispetto ai contenuti (e dunque leggete ogni cosa con molta attenzione prima di sottopormela).

SOMMARIO

In questa breve monografia verrà analizzata la tecnologia del *morphing* applicata in ambito aeronautico. Il concetto di *morphing* alare rappresenta una delle ultime frontiere della ricerca sia dal punto di vista strutturale che aerodinamico. Nel corso del tempo, sono state proposte svariate soluzioni *morphing*, tuttavia solo una piccola parte di esse è stata realizzata fisicamente in forma di prototipo e una percentuale ancora minore è stata testata in galleria del vento o in volo.

INDICE

INTRODUZIONE	5
1. CENNI STORICI	6
<i>Il morphing e l'ispirazione biologica</i>	<i>6</i>
<i>Leonardo da Vinci</i>	<i>6</i>
<i>I fratelli Wright</i>	<i>6</i>
<i>Bell X-5</i>	<i>7</i>
2. MORPHING ALARE NELLA CONTEMPORANEITÀ.....	8
<i>Materiali</i>	<i>8</i>
<i>Struttura.....</i>	<i>8</i>
<i>Approccio multidisciplinare</i>	<i>8</i>
<i>Limiti.....</i>	<i>9</i>
3. UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV)	10
<i>UAV lanciati con catapulta</i>	<i>10</i>
<i>NextGen Aeronautics MFX-2</i>	<i>10</i>
3.1 MAVs: configurazioni ad ala adattiva	11
CONCLUSIONI.....	13
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	14

INTRODUZIONE

La parola *morphing* è stata presa in prestito dalla lingua inglese e deriva dal verbo *to morph*, che indica un cambiamento graduale di qualcosa o qualcuno da una condizione ad un'altra [1].

Col passare degli anni, tale parola si è affermata sempre più in ambito fotografico e cinematografico, delineando un cambiamento graduale di un'immagine o la sua combinazione con un'altra, mediante l'utilizzo di appositi programmi per calcolatori.

In ambito aeronautico, invece, la parola *morphing* è diventata sinonimo di efficienza e innovazione, denotando una realtà, che affonda le sue radici nello sviluppo del volo naturale e che permette di individuare i probabili precursori di ciò che sarà il futuro del volo artificiale. Dunque, la tecnologia del *morphing* alare, che si basa su un cambiamento continuo e dolce della forma dell'ala, nonostante non sia un'idea nuova nel panorama culturale, rappresenta tuttora un fertile terreno di ricerca dalle applicazioni più varie e dagli sviluppi inediti.

Il *morphing* alare, come si può osservare dalla figura seguente, elimina l'istallazione di appendici mobili per il controllo del volo e di conseguenza permette di evitare l'eccessivo dispendio di energia, la complicazione e l'appesantimento strutturale dovuto all'aggiunta della parte impiantistica, che permetterebbe il movimento delle superfici mobili. Infatti, le ali di un aereo sono progettate così da essere ottimizzate per una

specifico condizione di volo, ma soffrono di minore efficienza in tutte le altre. Queste penalizzazioni possono essere ridotte attraverso l'opportuna deflessione di superfici di controllo convenzionali (incernierate) presenti sul bordo d'attacco e/o sul bordo d'uscita dell'ala. Queste superfici di controllo alterano il campo di moto attorno all'ala, modificando di fatto la curvatura della stessa in certe regioni, conducendo così ad una variazione delle forze aerodinamiche e dei momenti agenti sull'intera ala.

La principale risorsa, per realizzare la maggiore efficienza, generalmente (ma non è l'unica soluzione possibile) risiede nell'utilizzo di particolari materiali che in seguito ad un riscaldamento locale, ottenuto per effetto Joule, si deformano in maniera opportuna. Dunque, si rende così possibile la sostituzione di sistemi meccanici di leveraggi ed aste e, di sistemi idraulici, con linee di corrente e opportune resistenze che pervadono l'intera ala.

Nello specifico, si fa uso di sistemi di attuazione e strutture a controllo di forma in materiali adattivi (in genere ci si riferisce a tali soluzioni con il nome di tecnologie *smart*). Una struttura *smart* coinvolge la presenza di attuatori e sensori distribuiti e, uno o più microprocessori che analizzano l'output dei sensori e utilizzano la teoria dei controlli per comandare gli attuatori, il tutto al fine di applicare deformazioni e/o spostamenti localizzati, per alterare il comportamento della struttura stessa [2].

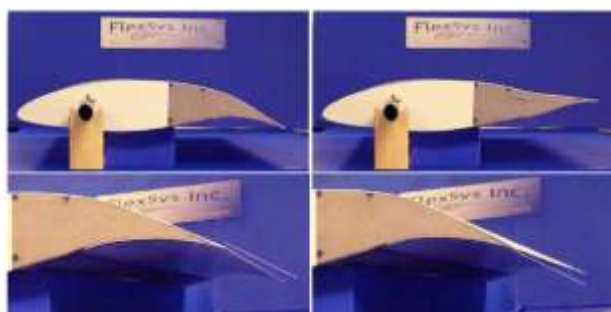


Figura 1: Modello di *morphing wing* realizzato dalla *FlexSys Inc* [3]

1. CENNI STORICI

Il morphing e l'ispirazione biologica

Il concetto di *morphing*, in realtà, non è nuovo nel settore aeronautico. L'idea di un'ala in grado di cambiare la propria forma, si basa sull'osservazione degli uccelli e del loro volo.

Per migliaia di anni, gli esseri umani guardarono affascinati il volare degli uccelli e la curiosità di capire come essi fossero capaci di volare, incrementò il desiderio umano di spiccare il volo e, in definitiva determinò la nascita degli aeroplani [4]. Essendo, dunque, i volatili la principale fonte di ispirazione per lo sviluppo dell'aeronautica, gli aeroplani dovrebbero ragionevolmente simulare, per quanto possibile, la natura, con l'obiettivo di essere quanto più economici ed efficienti, sfruttando soluzioni intelligenti.

Gli uccelli sono in grado di muovere a piacere le piume che compongono le loro ali e ciò gli consente di poter effettuare manovre non facilmente realizzabili dai velivoli odierni. I volatili possono muovere le piume a gruppi di tre-quattro donando così una forma ondulata all'ala; cambiando localmente e in modo continuo la curvatura, riescono a controllare il volo. Pertanto, nel cambiamento controllato della forma alare risiede la chiave di volta per rendere il volo artificiale il più possibile simile a quello naturale.



Figura 1.1: Esempio di un volatile con relativo cambiamento di curvatura alare [5]

Leonardo da Vinci

Non è un caso, infatti, che anche Leonardo da Vinci iniziò, attorno al 1490, gli studi sul volo degli uccelli, che lo portarono a realizzare diversi progetti di ornitottero, ossia aeromobili a superficie alare battente, in cui le ali erano manovrate dall'aviatore tramite un sistema di pedali e leve.



Figura 1.2: Modello tratto da un disegno di Leonardo sull'ornitottero [6]

I fratelli Wright



Figura 1.3: Simulazione del funzionamento del Wright Flyer a cura dello Smithsonian National Air and Space museum [7]

Anche il *Wright Flyer* (1903), ossia il primo velivolo a motore più pesante dell'aria, realizzato dai fratelli *Wright*, aveva delle ali che potevano essere deformate tramite un sistema di tiranti: si tratta quindi di un'ala adattiva (*morphing wing*) a tutti gli effetti. Tuttavia, è più corretto parlare, nel caso del *Wright Flyer*, di *warping wing*, in quanto la deformazione delle ali era necessaria per effettuare manovre e garantire il

controllo sul rollio, essenziale per stabilizzare il velivolo e farlo tornare alla sua posizione di equilibrio a seguito di disturbi esterni, come ad esempio le raffiche di vento.

Questo tipo di tecnologia è stato poi abbandonato a causa dell'introduzione dei metalli come materiale principale per la costruzione degli aeromobili, i quali non sono flessibili e facilmente deformabili come le ali di tela utilizzate sul *Wright Flyer*.

Bell X-5



Figura 1.4: Foto a più esposizioni che mostra le differenti posizioni delle ali a geometria variabile [8]

Un altro esempio di *morphing* è quello rappresentato dalle ali capaci di variare l'angolo di freccia durante le fasi di volo. Quando un aereo vola a velocità prossime e superiori a quelle del suono, si formano delle onde d'urto. Per mitigare gli effetti della comprimibilità, le ali si possono estendere all'indietro dando l'impressione di essere più lunghe. Tuttavia, questa configurazione risulta essere meno efficiente nel caso in cui si voli a basse velocità.

Il primo velivolo ad utilizzare ali in grado di cambiare l'angolo di freccia è stato il *Bell X-5*

(1958). Questo velivolo presentava tre posizioni per l'angolo di freccia: 20°, 40° e 60°. La cerniera dell'ala si spostava lungo un insieme di corte rotaie orizzontali, usando i freni a disco per bloccare l'ala nelle relative posizioni in volo. Nonostante l'aumento di peso dovuto ai componenti meccanici e alla complessità del sistema stesso, questa configurazione migliorava l'efficienza dell'aereo sia per alte velocità di volo che basse.



Figura 1.5: Modifica della configurazione alare di un falco peregrino nel passaggio da una condizione di *loiter* alla modalità di attacco [9]

In analogia ad un falco peregrino che cambia la sua forma alare dalla configurazione atta a massimizzare l'efficienza della crociera, alla configurazione atta ad operare una manovra aggressiva, nel momento in cui si appresta a cacciare una preda. Il cambiamento della geometria del corpo permette al volatile di ridurre la resistenza ed aumentare l'efficienza energetica nell'intento di catturare la preda, il che nel caso di un aeromobile si tradurrebbe nella diminuzione del carburante speso [10].

Dunque, grazie alla tecnologia del *morphing* alare, gli aeroplani sono in grado di simulare maggiormente il volo naturale e ciò comporta un miglioramento della loro *performance* in diverse condizioni di volo.

2. MORPHING ALARE NELLA CONTEMPORANEITÀ

Materiali

Per quanto concerne i materiali si tratta in particolar modo dell'utilizzo di attuatori e materiali *smart*, come ad esempio le leghe a memoria di forma (*Shape Memory Alloy*) [11].

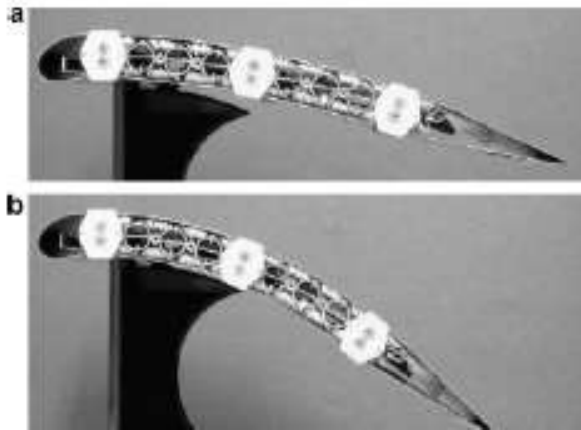


Figura 2.1: *Morphing* alare tramite l'uso di materiali S.M.A. (a) *Un-morphed* (b) *Morphed* [12]

I materiali *smart* sono in grado di cambiare la loro forma esterna in maniera significativa a seguito della ricezione di determinati stimoli che possono essere, ad esempio, temperatura, pressione e campo magnetico. Pertanto, l'utilizzo di materiali *smart* per la realizzazione dell'ala permette all'aeromobile di cambiare la sua geometria in volo. Sebbene tali materiali abbiano il grande vantaggio di implicare un'attuazione ridotta in termini di peso, il risultato che si ottiene non è detto che sia certo [13]. Pertanto, si potrebbe addirittura determinare una geometria disastrosa per il volo e, durante la missione l'aeroplano potrebbe perdere pericolosamente stabilità [11].

Struttura

In termini strutturali si fa uso di un meccanismo particolare: “*a single-piece flexible structure that delivers the desired*

motion by undergoing elastic deformation as opposed to the rigid body motion in a conventional mechanism.” [13], ovvero si utilizza una struttura flessibile monocomponente che permette il movimento desiderato mediante una deformazione elastica, opposta ad una deformazione rigida del corpo, tipica dei meccanismi convenzionali. Si ottiene in tal modo una modifica della forma alare in maniera armoniosa senza l'utilizzo di appendici alari incernierate alla superficie principale [11].

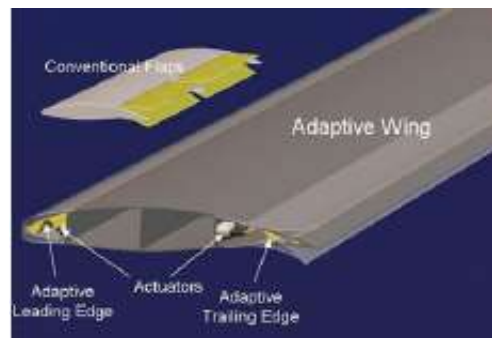


Figura 2.2: Esempio di ala adattiva [14]

L'attuatore è la sorgente del moto che permette l'innescio del meccanismo e di conseguenza la modifica voluta della configurazione alare; cambiamento che viene ottenuto attraverso una deformazione locale in corrispondenza del bordo d'attacco e/o del bordo d'uscita dell'ala [11].

La difficoltà risiede, pertanto, nella messa in opera di un *design* che sia al contempo flessibile a sufficienza per trasmettere il moto e rigido a sufficienza per resistere ai carichi alari [11].

Approccio multidisciplinare

L'approccio multidisciplinare è una tecnica passiva di *morphing* che minimizza l'energia richiesta per l'attuazione, migliorando l'efficienza energetica complessiva. Infatti, è molto simile al meccanismo di volo di un volatile [11].



Figura 2.3: Illustrazione dell'indipendenza di differenti sottosistemi in un volo con *morphing* [15]

1) Sensing

Un uccello ha bisogno di individuare e percepire (da cui il nome *sensing*) le condizioni atmosferiche intorno a lui per poter effettuare le azioni più corrette in un dato ambiente. In maniera simile, un velivolo che utilizza il *morphing* ha bisogno di accumulare il maggior numero di dati possibile, quali la quota barometrica, la velocità rispetto all'aria e la sua posizione, per poter reagire correttamente all'ambiente che lo circonda [16].

2) Computation

Dopo aver accumulato un numero sufficiente di informazioni, queste vengono memorizzate ed elaborate dalla mente di un volatile o, nel caso di velivolo dotato della tecnologia del *morphing*, dal computer di bordo che, attraverso *software FEM (Finite Elements Method)*, computa la risposta più corretta e genera risposte che attivano gli attuatori con energia minima [16].

3) Actuation

Oltre a strutture specifiche, i velivoli che sfruttano il *morphing* necessitano anche di particolari attuatori che muovono le strutture [16]. Gli attuatori, quindi, ricevono dal sistema di controllo i comandi da eseguire e cambiano la forma del profilo in modo da ottimizzare le prestazioni dell'aereo.

Limiti

Il limite principale che caratterizza il *morphing* è quello relativo alla sicurezza della struttura: i materiali impiegati ad esempio, possono non essere abbastanza robusti da resistere ai carichi che si generano sulle ali e questo, ovviamente, potrebbe portare ad eventi disastrosi. Inoltre, la durata stessa del *morphing* può rappresentare un ulteriore problema. Le prestazioni del velivolo possono essere influenzate in diversi modi durante il *morphing* delle ali ed è necessario che il *morphing* avvenga nel minor tempo possibile per minimizzare i rischi [11].

3. UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV)

UAV lanciati con catapulta

Negli ultimi anni, in tutto il mondo, i sistemi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) sono stati ampiamente utilizzati sia in ambito civile che militare [17]. Nel corso del tempo, numerosi sono stati i sistemi che sfruttarono e utilizzano tutt'oggi la tecnologia del *morphing*: alcuni tipi di UAV infatti, presentano al momento del decollo le ali piegate e dunque, possono essere lanciati da una catapulta tubolare e dispiegare le ali durante il volo. Questo tipo di tecnologia consente di ridurre lo spazio e il peso del velivolo e, ne facilita il trasporto. Inoltre, la catapulta garantisce una maggiore sicurezza, minore influenza del vento, una velocità di decollo maggiore e una migliore stabilità rispetto ad altri metodi di decollo [18].

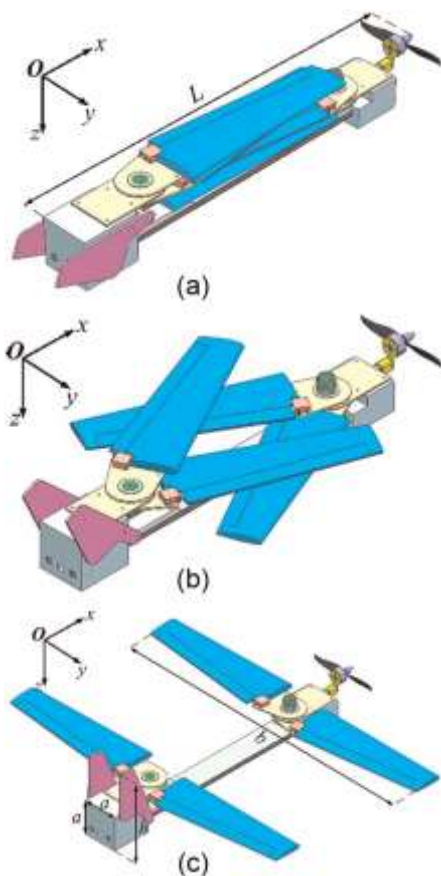


Figura 3.1: Schema di UAV con ali pieghevoli: (a) ali piegate, (b) fase di *morphing* e (c) ali dispiegate [18].

NextGen Aeronautics MFX-2

Nel 2007, la *NextGen Aeronautics* ha realizzato un modello di UAV dotato della tecnologia del *morphing*, l'MFX-2, capace di variare in modo indipendente l'area e l'angolo di freccia delle ali. La *US Defense Advanced Research Projects Agency* finanziò i test per mostrare le potenzialità della tecnologia *morphing* applicate a UAV militari capaci di combinare l'efficienza di velivoli da ricognizione con la rapidità di aerei da caccia [19].



Figura 3.2: MFX-2 della NextGen Aeronautics. Le aree grigie sulle ali sono i pannelli capaci di cambiare forma [19].

Questo velivolo a doppio getto presenta una struttura articolata e pannelli flessibili capaci di variare la superficie alare del 40%, l'apertura alare del 73% e l'allungamento alare del 177%, secondo la NextGen. Nei test effettuati nel 2007, sono state effettuate cinque prove in volo, dalla durata di 10 minuti ciascuna, in cui l'UAV, pur modificando la propria geometria, ha mantenuto il proprio assetto e rotta durante tutte le fasi di volo. Il tempo richiesto per passare da una configurazione ad un'altra è di circa 10 secondi [20].

3.1 MAVs: configurazioni ad ala adattiva



Figura 3.1.1: sviluppato da Prox Dynamics, *The black hornet Nano Unmanned Air Vehicle* è stato usato dalle truppe britanniche in Afghanistan [21]

Quella dei *Micro Air Vehicle* è una classe di UAVs dalle dimensioni limitate e dalle ottime caratteristiche in termini di modalità di volo invisibile (*stealth mode flight*). Altri punti di forza dei MAVs sono:

- basso costo;
- alta velocità della realizzazione;
- ispirazione biologica (insetti);
- minori requisiti per la *safety* e per la certificazione;
- carichi aerodinamici minori.



Figura 3.1.2: Ape robotica sviluppata dall'università di Harvard [21]

Sebbene si parli di MAVs da più di un decennio, solamente i recenti miglioramenti delle batterie e dei componenti tecnologici chiave, hanno permesso di rendere i MAVs da possibile innovazione, innovazione concreta.

Tuttavia, lo sviluppo di tale frontiera si è interfacciato con due possibili criticità:

- l'aerodinamica a bassi numeri di Reynolds (*"As you scale down, the air becomes thicker basically and becomes more of a challenge in terms of aerodynamic surfaces. The degree of complexity is multiplied"*, Dr. Stephen Prior);
- modalità di controllo del volo.

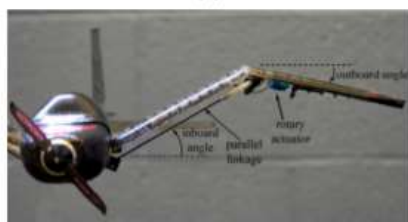
Quest'ultimo aspetto è critico in quanto l'utilizzo di tradizionali superfici di controllo potrebbe rappresentare un motivo di perdita di efficienza aerodinamica, dato che i meccanismi creerebbero discontinuità nella superficie e contribuirebbero a una non necessaria complicazione del flusso [4]. Inoltre, queste soluzioni tradizionali risulterebbero essere troppo complesse, ingombranti e pesanti per essere applicate su di una superficie alare così piccola. Pertanto, la realizzazione di un'ala adattiva (*morphing wing*) è stata identificata come una soluzione promettente per rimpiazzare le superfici di controllo tradizionali e per aumentare l'efficienza aerodinamica complessiva [22]. Inoltre, il *morphing* alare ha un grande potenziale per la riduzione del fenomeno del *flutter*, il che migliora direttamente la *safety* del velivolo, diminuisce notevolmente il rischio di problemi legati alla fatica del materiale [23,24] e permette di ottimizzare la manovrabilità del MAV [25,26].

L'apertura alare del velivolo presentato in figura 3.1.3 è di 62 cm in condizioni nominali e il suo peso è di circa 450g. Dunque, tale velivolo è abbastanza piccolo da poter essere considerato un MAV, ma è sufficientemente largo per poter trasportare un utile *payload*. Durante il volo si utilizza il *twist-wing morphing* dinamico (le sezioni alari possono

possono ruotare attorno ad un asse parallelo alla direzione longitudinale) per modificare l'allungamento alare e per controllare il moto attorno all'asse di rollio. Lo svergolamento non solo permette un efficiente controllo del volo, ma consente di mantenere immutati gli effetti benefici di un'ala flessibile.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1.3: *morphing* di un'ala Pulaski (ala a gabbiano) di un MAV [27]



Figura 3.1.4: ulteriore esempio di *morphing wing* (realizzata in fibra di carbonio e nylon ripstop) in un MAV [27]

CONCLUSIONI

La tecnologia del *morphing* alare è senza dubbio il futuro del progetto di velivoli.

Mediante un cambiamento della forma alare in volo, permette agli aeromobili di lavorare efficientemente in diverse condizioni operative, proprio come i volatili, che cambiano la geometria dell'ala per assolvere a diversi compiti. L'obiettivo definitivo di tale tecnologia è l'ottimizzazione delle emissioni nocive durante il volo e il miglioramento della manovrabilità. Tuttavia, affinché essa diventi realtà diffusa è necessario provare più che mai, le condizioni di *safety* in cui opera, in modo tale che il risultato ottenuto non sia causa di aumento del rischio di incidenti ed inoltre, è fondamentale che essa non implichi un eccessivo aumento di complessità e costi.

Se tali debolezze verranno arginate, un futuro in cui “*giant birds*” e “*small insects*” popoleranno il cielo ed assolveranno a missioni uniche, volando e deformando le loro ali in maniera fluida ed efficiente, non è lontano.

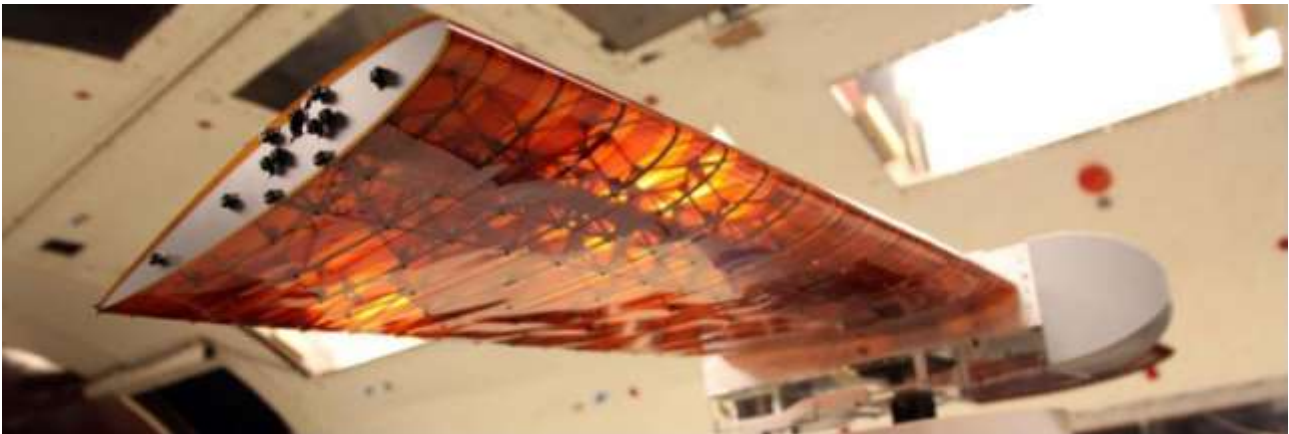


Figura 4: NASA MIT Bending wing design made with “advanced carbon fiber composite materials” [28]

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Significato desunto dalla consultazione online del *Cambridge Dictionary*
<https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/morphing>
- [2] S. Barbarino (2005), Tesi di Laurea: Applicazione delle Leghe a memoria di forma (S.M.A.) per il *Morphing* in Campo Aeronautico
<https://www.tesionline.it/tesi/preview/applicazione-delle-leghe-a-memoria-di-forma--sma--per-il-morphing-in-campo-aeronautico/23009/1>
- [3] https://www.researchgate.net/figure/Compliant-Morphing-Wing-Concept-of-FlexSys-Inc-6_fig4_267329358
- [4] S. Barbarino, O. Bilgen, R. M. Ajaj, M.I. Friswell e D.J. Inman. (2011, June). *A review of Morphing Aircraft. Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [online]. 22, pp 823-877.
http://michael.friswell.com/PDF_Files/J194.pdf
- [5] https://www.nas.nasa.gov/assets/pdf/ams/2014/AMS_20140422_Nguyen.pdf
- [6] https://www.museoscienza.org/it/dipartimenti/catalogo_collezioni/schedaoggetto.asp?idk_in=ST070-00088
- [7] https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wright-flyer/nasm_A19610048000
- [8] Foto estrapolata dall'archivio fotografico online del *National museum of the United States Air Force*
<https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/FactSheets/Display/Article/195758/bell-x-5/>
- [9] http://files.dnr.state.mn.us/publications/volunteer/young_naturalists/bird_flight/bird_flight.pdf
- [10] Fausz. (2010). *Morphing Flight: Beyond Irreducible Complexity* [Online]
<https://www.apologeticspress.org/apPubPage.aspx?pub=1&issue=621>
- [11] Young Keong Yap (Aaron), *The Morphing Wing*
- [12] <http://origin-ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0261306909004968-gr4.jpg>
- [13] K. Lu and S. Kota. (2003, June). *Design of Compliant Mechanisms for Morphing Structural Shapes. Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, pp. 379-391.
<http://www.seas.gwu.edu/~kjl/papers/jimss03-KJLU.pdf>
- [14] <http://www.flxsys.com/Applications/Shape%20Morphing/Adaptive%20Compliant%20Wing/>
- [15] <https://www.apologeticspress.org/apPubPage.aspx?pub=1&issue=621>
- [16] J. Fausz. (2010). *Morphing Flight: Beyond Irreducible Complexity* [Online].
<https://www.apologeticspress.org/apPubPage.aspx?pub=1&issue=621>
- [17] Hardin PJ and Jensen RR. Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: challenges and opportunities. *GI Sci Remote Sens* 2011; 48: 99–111

- [18] G. Liang, L. Changle, J. Hongzhe, Z. Yanhe, Z. Jie, C. Hegao (January 2017). *Aeodynamic characteristics of a novel catapult launched morphing tandem-wing unmanned aerial vehicle*
- [19] <https://highlandwolf.com/2014/12/27/mfx-2-was-nextgens-second-generation-morphing/>
- [20] <https://www.flightglobal.com/nextgens-shape-changing-uav-morphs-in-flight/76821.article>
- [21] <https://www.theengineer.co.uk/the-rise-of-the-micro-air-vehicle/>
- [22] Vasista S, Tong L and Wong KC. *Realization of morphing wings: A multidisciplinary challenge*. J Aircraft 2012; 49: 11–28
- [23] Thill C, Etches J, Bond I, et al. *Morphing skins*. Aeronaut Journal; 2008; 3216: 1–23
- [24] Gomez JC and Garcia E. *Morphing unmanned aerial vehicles*. Smart Mater Struct 2011; 20: 1–16
- [25] Abdulrahim M. *Flight performance characteristics of a biologically-inspired morphing aircraft*. In: 43rd AIAA aerospace sciences meeting and exhibit, Reno, NV, USA, 2005
- [26] Bachmann RJ, Vaidyanathan R, Boria FJ, et al. *Flying insects and robots: A miniature vehicle with extended aerial and terrestrial mobility*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009, pp.247–269
- [27] Daniel T Grant, Mujahid Abdulrahim and Rick Lind (2010), *Design and analysis of biomimetic joints for morphing of micro air vehicles*
- [28] <https://inhabitat.com/mit-and-nasa-unveil-morphing-airplane-wing-that-could-revolutionize-aviation/>