

BIOMIMÉTICA DEL VUELO: SIMULACIONES NUMÉRICAS DE LA CINEMÁTICA DE ALAS BATIENTES

B. Roccia^a, S. Preidikman^{a,b} y C. Gebhardt^b

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto.
Campus Ruta 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina.

^b Departamento de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba.
Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina.

Email: broccia@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN

Se presenta un código computacional para estudiar la cinemática de micro-vehículos aéreos de alas batientes (MAVs). El código desarrollado integra datos de la biología experimental con métodos de predicción utilizados en ingeniería. Debido a que los MAVs deben tener capacidades de maniobra similares a la de los de pájaros e insectos, se utiliza la herramienta numérica para simular el complejo movimiento que experimentan las alas de estas criaturas en diferentes condiciones de vuelo, como por ejemplo el "hover". Ya que una descripción cuantitativa y precisa de la cinemática es crucial para un correcto análisis dinámico, aerodinámico y aeroelástico del vuelo "natural", se estudian, además, las variables características que intervienen a lo largo de un ciclo de batimiento. Un estudio de este tipo provee información sobre el movimiento 3-D de las alas respecto del cuerpo, y del movimiento de la criatura respecto del medio que lo rodea, y es de vital importancia para abordar en un futuro el análisis aerodinámico, aeroelástico y aeroservoelástico de MAVs.

El software elaborado cuenta con una interfaz gráfica que permite preprocesar y visualizar en forma interactiva los resultados provenientes de las simulaciones numéricas, tales como trayectorias 3-D, velocidades y aceleraciones de puntos materiales pertenecientes al ala.

Palabras clave: Alas batientes, Cinemática, Micro-vehículos aéreos, Biomimética.

INTRODUCCIÓN

En la naturaleza, los insectos y los pájaros constituyen dos caminos diferentes de la evolución del vuelo animal. A pesar de que ambos tipos de vuelo se basan en alas batientes, existen diferencias sustanciales entre ellos, por ejemplo, la mayoría de las aves a excepción del colibrí necesitan moverse hacia delante a una determinada velocidad para generar sustentación, esta restricción impide que los pájaros ejecuten ciertos tipos de vuelos, como por ejemplo el "hover". Sin embargo, en el mundo de los insectos el "hover" es una técnica de vuelo corriente.

Una de las claves para lograr agilidad en el vuelo con alas batientes reside en la habilidad para variar la cinemática de cada aleteo. Resulta crucial poder realizar análisis detallados de la cinemática para entender integralmente el vuelo animal, para llevar a cabo el modelado aerodinámico, y para captar los mecanismos aerodinámicos que se están empleando. Un estudio de este tipo provee información sobre el movimiento 3-D de las alas respecto del cuerpo, y del movimiento de la criatura respecto del medio que lo rodea. El movimiento que experimentan las alas a lo largo de un ciclo de batimiento es muy complejo e involucra simultáneamente rotaciones, oscilaciones, y cambios significativos del ángulo de ataque.

Las alas realizan trayectorias extremadamente complicadas influenciando directamente la capacidad de maniobra del insecto y produciendo diferentes mecanismos aerodinámicos no-estacionarios y altamente no-lineales que son eficaces cuando los números de Reynolds son bajos. Algunos de estos mecanismos, como por ejemplo el retraso de la pérdida dinámica, la circulación adicional generada por la rotación del ala y la captura de la estela, entre otros, ofrecen ventajas únicas respecto de los bien conocidos vehículos aéreos de alas fijas, tales como mejor sustentación y capacidad de generación de empuje sin la necesidad de incrementar el peso.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El ciclo de batimiento puede ser dividido en cuatro fases [1, 2]: *i*) una primera etapa de traslación donde el ala realiza un movimiento descendente desde la parte dorsal hacia el vientre del insecto, llamada “downstroke”, *ii*) hacia el final del “downstroke” el ala gira rápidamente e invierte su dirección de movimiento “supination”, *iii*) una segunda etapa de traslación donde el ala se mueve en una dirección opuesta, desde el vientre hacia la parte dorsal del insecto, llamada “upstroke”, y *iv*) hacia el final del “upstroke” el ala vuelve a girar e invierte nuevamente la dirección de su movimiento “pronation”. Las fases *ii*) y *iv*) pueden ser clasificadas como la porción rotacional del ciclo de batimiento. Cada medio ciclo de aleteo, ya sea downstroke o upstroke, se denomina “half-stroke”. En la **Figura 1** se presenta un esquema con las diferentes fases explicadas anteriormente.

Para estudiar la cinemática de alas batientes, en este trabajo, se adopta la geometría de una mosca doméstica (*drosophila melanogaster*). El modelo utilizado se elaboró mediante el software de diseño SolidWorks y se muestra en la **Figura 2**.

El sólido mostrado en la **Figura 2b** se exportó a formato DXF mediante una técnica de triangulado propia de SolidWorks® (3DFACE). El código computacional desarrollado en este esfuerzo cuenta con una rutina de preprocesamiento que extrae de los archivos DXF las coordenadas de los nodos y genera las conectividades de los elementos. La malla que se utilizó para discretizar el insecto tiene 1902 nodos y 3796 elementos triangulares de tres nodos.

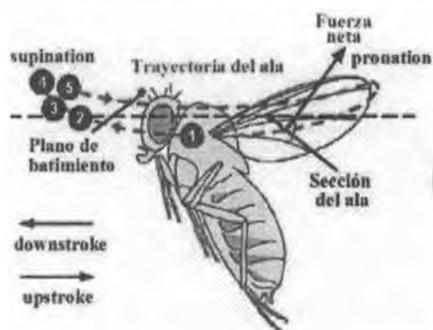


Figura 1. Esquema con las fases de un ciclo de batimiento [3].

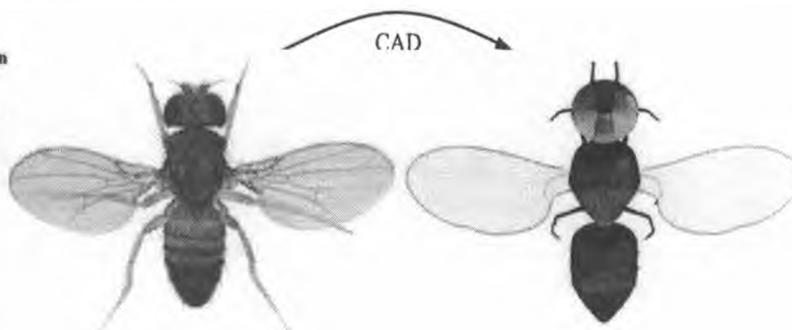


Figura 2. Geometría espacial del modelo adoptado:
(a) Fotografía de una mosca doméstica real;
(b) Modelo construido en SolidWorks®.

Planos de proyección

Debido a las complicaciones existentes para realizar mediciones precisas del movimiento espacial del ala durante un ciclo de batimiento, los biólogos describen dicho movimiento proyectando la trayectoria de puntos materiales pertenecientes al ala sobre tres planos mutuamente perpendiculares [4], *i*) el plano transversal, *ii*) el plano sagital, y *iii*) el plano frontal (ver **Figura 3**). El plano sagital divide el insecto en una mitad derecha y una mitad izquierda, el plano transversal divide el mismo en una porción anterior y otra porción posterior, y el plano frontal divide la criatura en una parte dorsal y otra parte ventral respectivamente.

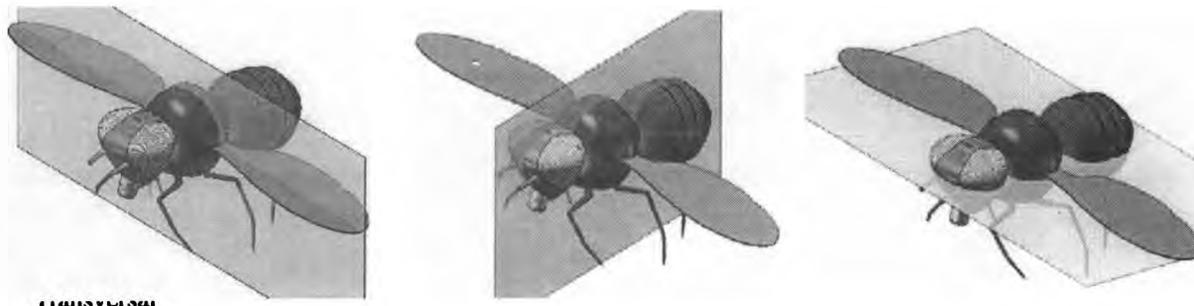


Figura 3. Planos utilizados para estudiar la morfología del insecto.

Sistemas de referencia y patrones cinemáticos

Los sistemas de referencia comúnmente utilizados para estudiar el movimiento del ala de algunos insectos voladores son tres: *i*) un sistema de referencia fijo al cuerpo; *ii*) un sistema de referencia fijo al plano de aleteo (stroke plane); y *iii*) un sistema de referencia fijo o inercial [5,6,7]. El sistema fijo al plano de aleteo fue utilizado por varios investigadores para facilitar la descripción de la cinemática del ala.

En este trabajo se emplean cuatro sistemas de referencias, *i*) un sistema de referencia inercial o Newtoniano $N=(n_1, n_2, n_3)$, *ii*) un sistema fijo al cuerpo del insecto, ubicado en el centro de masa del tórax $T=(t_1, t_2, t_3)$ *iii*) un sistema fijo al plano de aleteo $Z=(z_1, z_2, z_3)$, y *iv*) un sistema fijo al ala del insecto para facilitar la discretización espacial de la misma, sobre el ala izquierda $B=(b_1, b_2, b_3)$ y sobre el ala derecha $A=(a_1, a_2, a_3)$, (ver Figura 4).

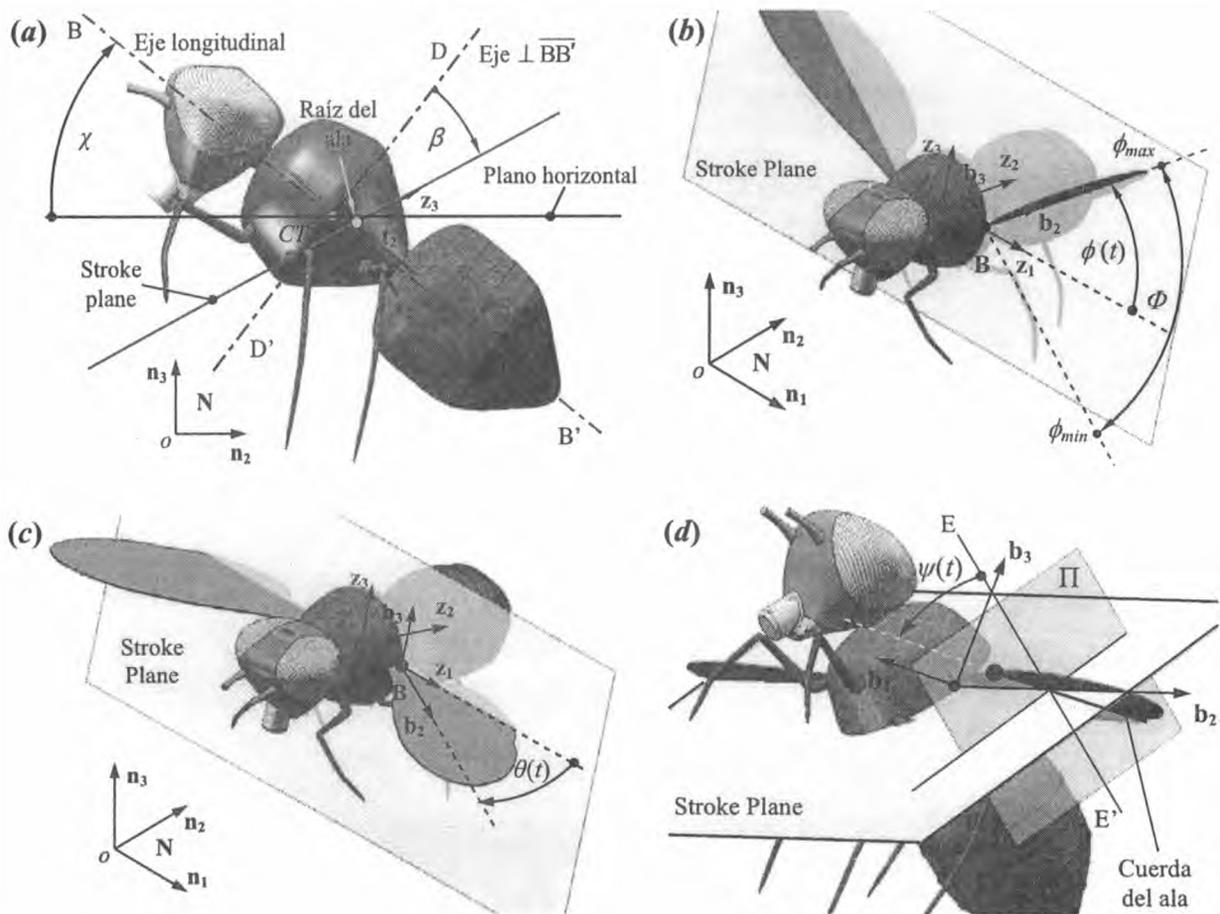


Figura 4. Definición de los sistemas de referencia y parámetros cinemáticos.

El ángulo que determina la orientación del cuerpo del insecto respecto del marco de referencia inercial, N , se denomina “body angle”, χ , y se lo define como el ángulo formado por el eje longitudinal del cuerpo del insecto $\overline{BB'}$ y el plano horizontal (ver Figura 4a). El ángulo del plano de aleteo “stroke plane angle”, β , tiene mucha influencia sobre insectos cuya frecuencia de batimiento es alta, el código computacional desarrollado en este esfuerzo mide este ángulo respecto al eje $\overline{DD'}$ perpendicular al eje longitudinal del insecto (ver Figura 4a). Este tipo de definición facilita la implementación de ángulos de Euler para obtener la orientación instantánea del ala durante un ciclo de batimiento.

En ausencia de deformaciones, la cinemática del ala se puede describir especificando la evolución temporal de tres ángulos: *i*) el ángulo que orienta el ala respecto del plano de batimiento, “stroke position”, $\phi(t)$ (ver Figura 4b); *ii*) el ángulo de desviación respecto del plano de batimiento, “stroke deviation”, $\theta(t)$ (ver Figura 4c); y *iii*) el ángulo de rotación respecto del eje longitudinal del ala, $\psi(t)$, (ver Figura 4d).

CNEMÁTICA

Transformación de coordenadas

Para describir la trayectoria de un punto arbitrario contenido en el ala del insecto, el código desarrollado sigue la siguiente secuencia:

- Orienta el insecto en el espacio mediante el “body angle” χ .
- Orienta el plano de aleteo respecto de un eje perpendicular al eje longitudinal del insecto utilizando el ángulo β .
- Orienta el ala respecto del marco de referencia \mathbf{Z} , fijo al plano de aleteo, utilizando una secuencia de ángulos de Euler (1–3–2) mediante los ángulos $\varphi(t)$, $\theta(t)$, y $\psi(t)$.

Velocidades y aceleraciones

En este esfuerzo, las expresiones de las velocidades y aceleraciones de puntos materiales contenidos en el ala se formulan en términos del sistema \mathbf{B} fijo al ala como se muestra en las ecuaciones (2) y (3). Por razones de espacio se omite la deducción de las mismas, el lector puede derivar dichas fórmulas siguiendo el procedimiento descrito en [8].

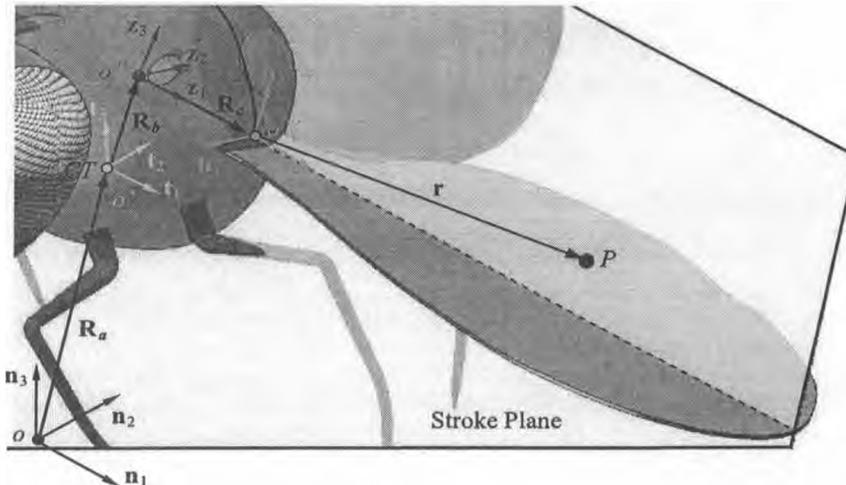


Figura 5. Vector posición de un punto genérico P sobre el ala.

El vector posición de un punto material contenido en el ala (ver Figura 5) está dado por,

$$\{\mathbf{R}_p\} = \{\mathbf{R}_a\} + \{\mathbf{R}_b\} + \{\mathbf{R}_c\} + \{\mathbf{r}\} \quad (1)$$

donde los vectores $\{\mathbf{R}_a\}$, $\{\mathbf{R}_b\}$ y $\{\mathbf{R}_c\}$ no cambian con el tiempo, y $\{\mathbf{r}\}$ es el vector posición de una partícula material del ala medido respecto del sistema de referencia \mathbf{B} .

La velocidad respecto del marco \mathbf{N} de un punto genérico P sobre el ala resuelta en términos del marco de referencia \mathbf{B} es,

$$\{\mathbf{V}_p^N\}_B = \frac{^N d}{dt} \{\mathbf{R}_p\} = \{^N \boldsymbol{\omega}^B\}_B \times \{\mathbf{r}\}_B \quad (2)$$

y la aceleración respecto del marco \mathbf{N} de un punto genérico P sobre el ala resuelta en términos del marco de referencia \mathbf{B} es,

$$\{\mathbf{A}_p^N\}_B = \frac{^N d^2}{dt^2} \{\mathbf{R}_p\} = \{^N \boldsymbol{\alpha}^B\}_B \times \{\mathbf{r}\}_B + \{^N \boldsymbol{\omega}^B\}_B \times \{^N \boldsymbol{\omega}^B\}_B \times \{\mathbf{r}\}_B \quad (3)$$

donde $\{\omega^B\}_B$ y $\{\alpha^B\}_B$ son la velocidad angular y la aceleración angular del marco de referencia fijo al ala **B** respecto del marco de referencia inercial **N** resueltos en términos del marco **B** [9, 10].

INTERFAZ GRÁFICA DE LA HERRAMIENTA NUMÉRICA

La interfaz gráfica fue desarrollada íntegramente en MATLAB® mediante el uso del módulo GUIs (Graphical User Interfaces) [11]. En la **Figura 6** se presenta la pantalla interfaz gráfica principal del programa desarrollado, a la derecha del insecto se puede observar un menú interactivo que permite visualizar los planos definidos anteriormente y los marcos de referencia adoptados para estudiar en forma completa la cinemática de las alas de un insecto. Finalmente existe un tercer menú que permite analizar todas las variables características que intervienen a lo largo de un ciclo de batimiento y también simular la cinemática de diferentes puntos contenidos en el ala.

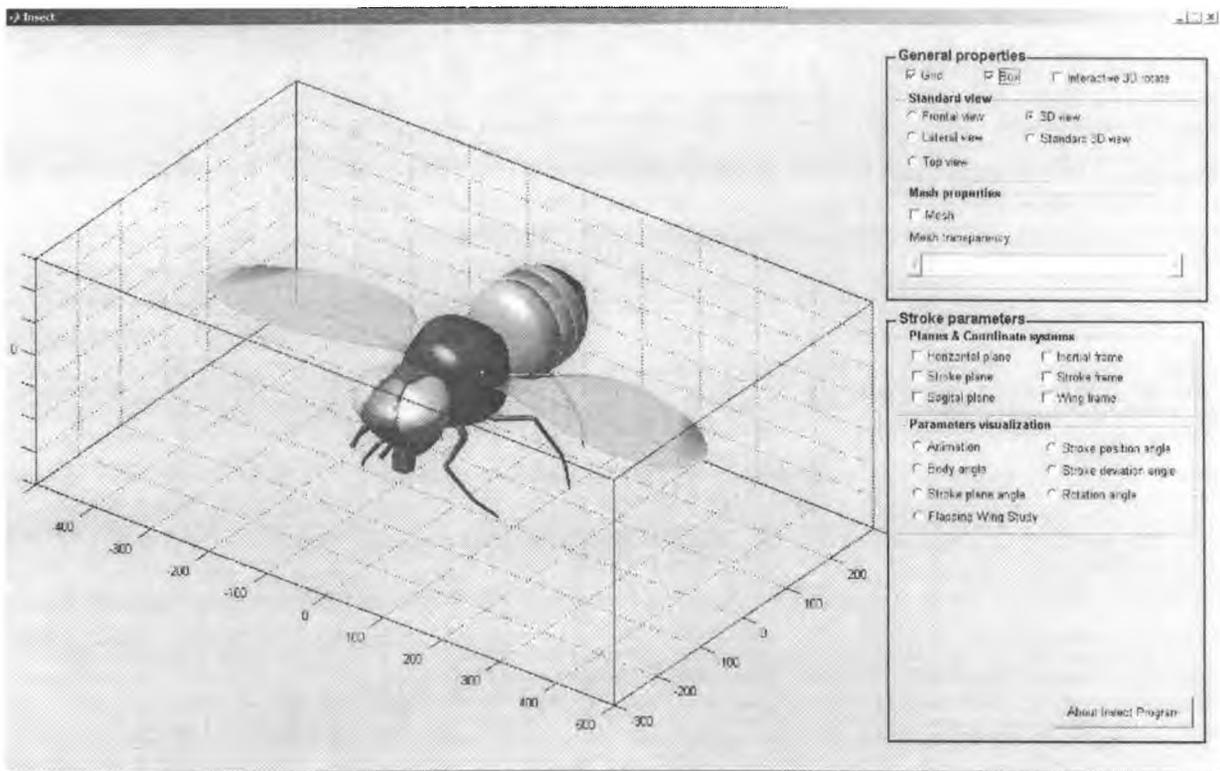


Figura 6. Pantalla principal de la interfaz GUI desarrollada.

El carácter interactivo de las pantallas mostradas en las **Figuras 7a** y **7b** facilitan enormemente el preprocesamiento de los datos discretos provenientes de mediciones experimentales realizadas sobre la cinemática de las alas de insectos, y seleccionar puntos arbitrarios sobre la superficie del ala del insecto para determinar sus trayectorias 3-D, velocidades y aceleraciones.

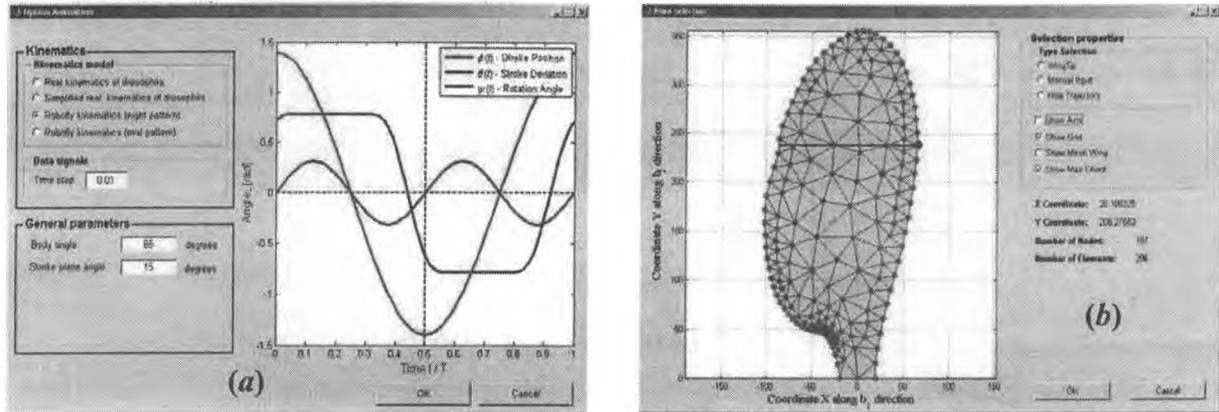


Figura 7. Algunas pantallas de la herramienta numérica desarrollada.

SIMULACIONES NUMÉRICAS

Señales de entrada

En la literatura se encuentran diferentes modelos cinemáticos para investigar las características aerodinámicas del vuelo de insectos. En este trabajo se utiliza una representación real de la cinemática de una mosca doméstica, la cual ha sido medida y procesada por Lentink y publicada por Bos [12] (ver Figura 8).

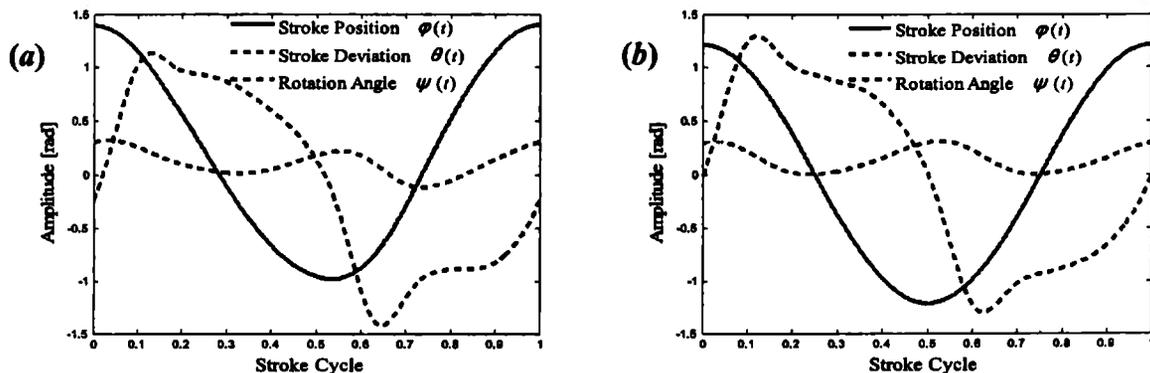


Figura 8. Señales de entrada: (a) Representación real de la cinemática de una mosca; (b) Representación real simplificada de la cinemática de una mosca.

Trayectorias 3D y proyecciones 2D de la punta del ala

En este trabajo el valor utilizado para el “body angle” es $\chi = 75^\circ$, y para el “stroke plane angle” es $\beta = 15^\circ$. Estos valores producen un plano de aleteo perfectamente horizontal el cual es característico de un tipo especial de vuelo conocido como “hover”. La envergadura del ala tiene un valor $R = 2,47$ mm y la frecuencia de batimiento del ala, $n_f = 200$ Hz [13, 14]. En la Figura 9 se presenta el ala discretizada mediante elementos triangulares simples de tres nodos adimensionalizada respecto de la envergadura R .

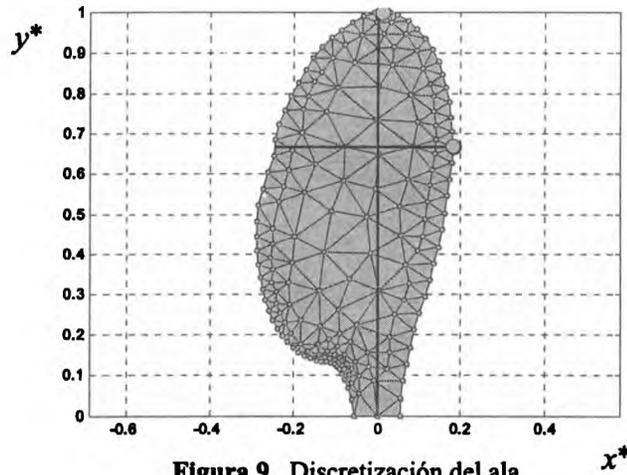


Figura 9. Discretización del ala.

En la Figura 10 se utilizan puntos en color azul para describir la trayectoria de la punta del ala correspondiente a la fase descendente del ala durante el ciclo de batimiento (downstroke). Los puntos en color rojo corresponden a la fase ascendente del ala durante el ciclo de batimiento (upstroke). El patrón en forma de ocho observado en la proyección 2D sobre el plano sagital (Figura 10b) ha sido confirmado por varios investigadores a lo largo de décadas de trabajo. El movimiento complejo del ala durante un ciclo de batimiento ocasiona que diferentes puntos materiales contenidos en el ala sigan trayectorias radicalmente distintas, por lo tanto un análisis integral de la cinemática del ala es fundamental para intentar un correcto análisis aerodinámico del vuelo de insectos. Por razones de espacio no se presentan las trayectorias de otros puntos distribuidos sobre el ala. La protuberancia extra en el ángulo de rotación (ver Figura 8), tanto en el comienzo del downstroke como en el del upstroke, origina una disminución en la amplitud del ángulo de ataque efectivo del ala, lo cual implica que la orientación del ala es casi horizontal. Esto se traduce en un marcado decremento de las fuerzas de arrastre sobre el ala que mejora la performance aerodinámica del insecto.

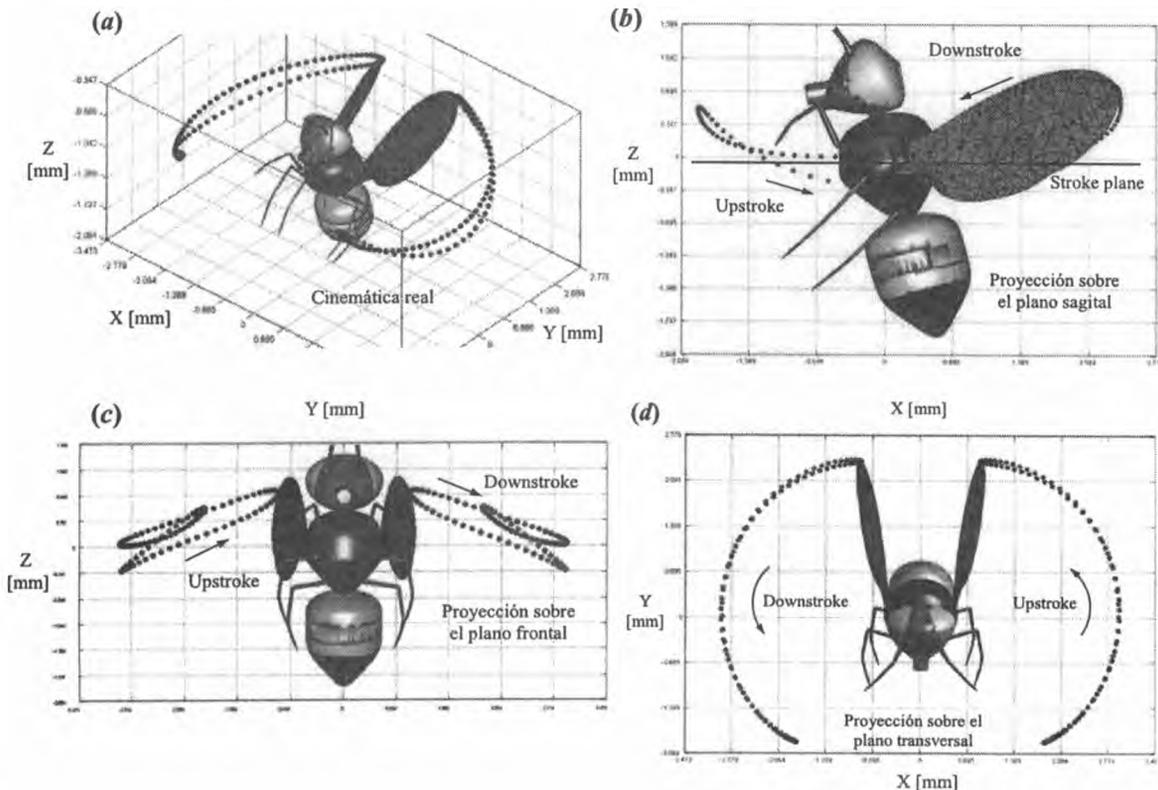


Figura 10. Trayectoria de la punta del ala en un ciclo de batimiento; a) Trayectoria 3D de la punta del ala; b) Proyección 2D sobre el plano sagital; c) Proy. 2D sobre el plano frontal; d) Proy. 2D sobre el plano transversal.

CONCLUSIONES

En este esfuerzo se desarrolló una herramienta computacional interactiva para estudiar la compleja cinemática asociada a las alas de micro-vehículos aéreos no-tripulados súper-maniobrables de alas batientes. El código desarrollado sirve como nexo entre el lenguaje descriptivo utilizado por los biólogos y el lenguaje predictivo usados por los ingenieros. Esto permite estudiar, analizar y visualizar los principales patrones cinemáticos que interactúan entre sí en cada ciclo de batimiento para producir los complejos movimientos a los cuales están sometidas las alas de los insectos. Por otro lado, el programa incorpora un módulo de interpolación que preprocesa los datos discretos provenientes de mediciones experimentales realizadas sobre la cinemática de las alas.

La interfaz gráfica implementada en este software facilita en gran medida el post-procesamiento de los resultados provenientes de las simulaciones numéricas y cuenta con un módulo que permite exportar datos tales como posiciones, velocidades y aceleraciones de puntos materiales pertenecientes al ala con el fin de poder llevar a cabo el análisis aerodinámico de un ciclo de batimiento característico. En un futuro está previsto incorporar al programa un módulo que permita determinar la distribución de esfuerzo cortante y momento flector en el ala, y dotar a las alas de características elásticas para estudiar cómo la deformación del perfil del ala, la torsión, la flexión transversal, y la expansión y contracción de la superficie alar, influyen sobre la producción de fuerzas aerodinámicas.

REFERENCIAS

1. M.H. Dickinson, F.O. Lehmann and S.P. Sane: Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight; *Science*, 1999, Vol. 284, pp. 1954-1960.
2. B. Singh, M. Ramasamy, I. Chopra and J.G. Leishman: "Experimental studies on insect-based flapping wings for micro hovering air vehicles"; 2004, Alfred Gessow Rotorcraft Center, Department of Aerospace Engineering, University of Maryland at College Park, MD 20742.
3. B. Singh and I. Chopra: Airloads prediction for flapping and rotary wing MAVs; 10th International workshop on aerolasticity of rotorcraft systems, 2006.
4. A.K. Brodsky: "The evolution of insect flight"; 1999, Oxford University Press Inc., New York.
5. C.P. Ellington: The aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics; *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 1984, Vol. 305, no. 1122, pp. 41-78.
6. M. Valdez, S. Preidikman y J. Massa: Aerodinámica de flujos bidimensionales e inestacionarios dominados por vorticidad; *Revista Mecánica Computacional*, 2006, Vol. 25, pp. 2333-2357.
7. M. Vanella, S. Preidikman y J. Massa: Un modelo híbrido de cuerpos rígidos y flexibles para estudiar la cinemática no-lineal de micro-vehículos aéreos súper-maniobrables de alas batientes inspirados en la biología; *Tercer Congreso Argentino de Tecnología Espacial*, 2005.
8. B. Roccia, S. Preidikman y J. Massa: Desarrollo de un código computacional para simular y analizar la cinemática de alas batientes; *Revista Mecánica Computacional*, 2007, Vol. 26, pp. 3224-3245.
9. H. Baruh: "Analytical dynamics"; 1999, McGraw Hill.
10. T.R. Kane: "Dynamics"; 1968, Holt, Rinehart and Winston, Inc.
11. MathWorks: "MATLAB[®] Creating Graphical User Interfaces"; 2007, The MathWorks, Inc.
12. F.M. Bos, D. Lentink, B.W. van Oudheusden and H. Bijl: Numerical study of kinematic wing models of hovering insect flight; 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2007, pp. 1-18.
13. J.M. Zanker: The wing beat of *Drosophila melanogaster* I. Kinematics; *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 1990, Vol. 327, pp. 1-18.
14. J.M. Zanker: The wing beat of *Drosophila melanogaster* II. Dynamics; *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 1990, Vol. 327, pp. 19-44.