

DE LA BIOLOGÍA A LOS INSECTOS ROBÓTS: DESARROLLO DE UN CÓDIGO COMPUTACIONAL INTERACTIVO PARA ESTUDIAR LA CINEMÁTICA DE ALAS BATIENTES

Bruno Roccia^a, Sergio Preidikman^{a,b} y Julio Massa^{a,b}

^a *Departamento de Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto
Campus Universitario, Ruta Nacional 36 Km. 601. 5800 Río Cuarto. Argentina.
Tel./Fax.: 0358-4676246 broccia@ing.unrc.edu.ar, <http://www.ing.unrc.edu.ar>*

^b *Departamento de Estructuras. Facultad de C. E. F y N. Universidad Nacional de Córdoba
Tel. : 0351-4334145, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina.
spreidik@wam.umd.edu, jmassa@efn.uncor.edu, <http://www.efn.uncor.edu>*

Palabras clave: vuelo natural, cinemática, alas batientes, biología, micro-vehículos aéreos.

Resumen. Se presenta un código de computación interactivo que sirve como nexo entre el lenguaje “descriptivo” utilizado por los biólogos y el lenguaje “predictivo” usado por los ingenieros. El código desarrollado facilita el estudio y análisis de los patrones cinemáticos asociados a diferentes condiciones del vuelo natural donde las alas batientes producen, al mismo tiempo, sustentación y empuje a partir de movimientos complejos relativos a sus trayectorias de vuelo. Estos mecanismos constituyen una alternativa muy atractiva para desarrollar micro-vehículos aéreos. Se ha desarrollado una interfase gráfica que permite visualizar los resultados provenientes de las simulaciones numéricas como así también las variables características que intervienen en cada ciclo de batimiento. El programa cuenta con un módulo que permite exportar datos tales como posiciones, velocidades y aceleraciones de puntos materiales pertenecientes al ala con el fin iniciar un primer análisis aerodinámico del movimiento de las alas a lo largo de un ciclo de batimiento. El fin último de este trabajo es desarrollar herramientas de simulación para estudiar la dinámica y aerodinámica de insectos y pájaros pequeños, y desarrollar sistemas dinámicos finitos para estudiar la aeroelasticidad de insectos y pájaros como así también la aeroservoelasticidad de micro-vehículos aéreos de alas batientes.

1 INTRODUCCIÓN

El reciente interés por los micro-vehículos aéreos (MAVs) está motivado por las numerosas aplicaciones civiles y militares, y por los grandes avances en la reducción de dispositivos electrónicos, tales como, sistemas micro-electromecánicos (MEMS), cámaras CCD en miniatura, sensores infrarrojos y detectores de sustancias peligrosas, entre otros. Para realizar este tipo de investigaciones, la Agencia de Proyectos Avanzados (DARPA) inició un programa para desarrollar una nueva familia de micro-vehículos aéreos, los cuales tienen una dimensión máxima de 15 cm y un peso límite de 100 gr. En la Figura 1 se muestran algunos MAVs existentes, como así también el rango de operación según los parámetros definidos por DARPA.

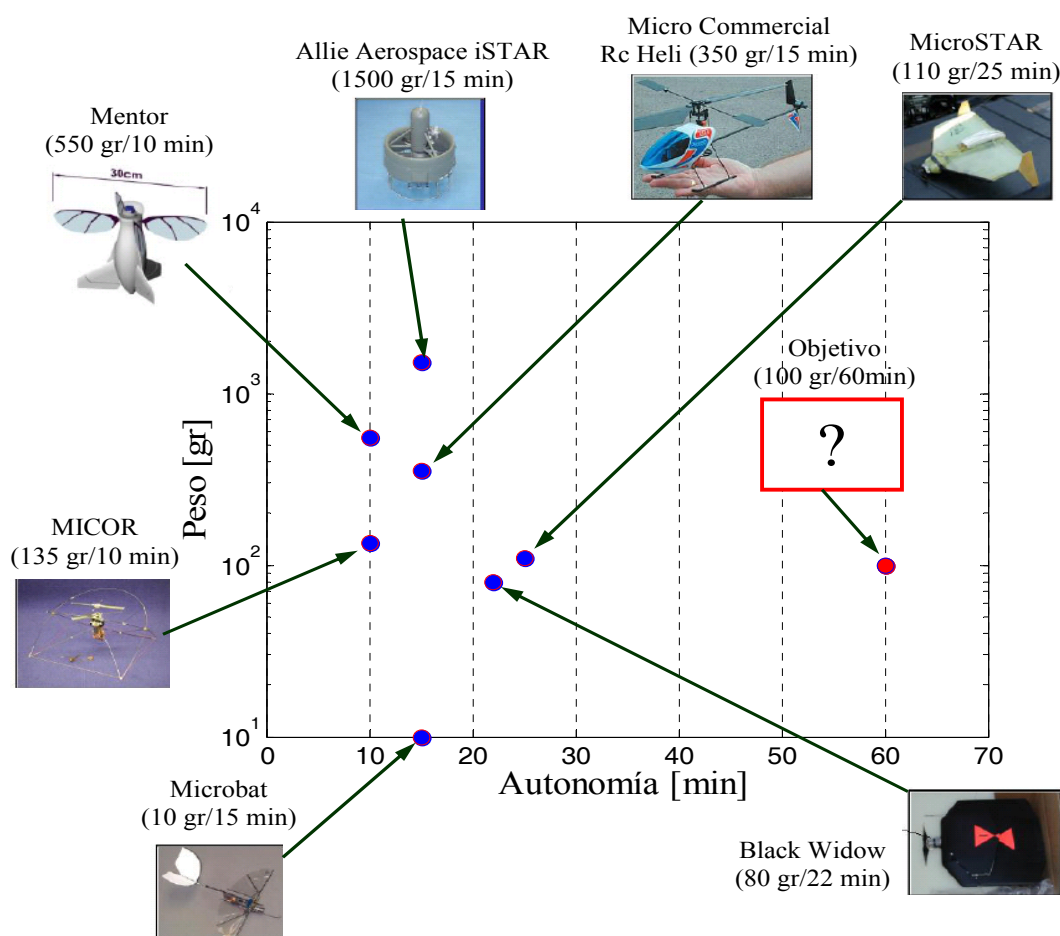


Figura 1: Rango de operación de MAVs existentes (Singh et al., 2004)

En la naturaleza, los insectos y los pájaros siguieron dos caminos diferentes en 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 adelante 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. Se ha recopilado mucha información de algunos parámetros cinemáticos fáciles de medir; como por

ejemplo, la frecuencia de batimiento del ala. Sin embargo, otros igualmente importantes son mucho más complejos de determinar. El mecanismo fundamental de batimiento del ala fue descrito por primera vez por Osborne (1951), quien introdujo el concepto de plano de batimiento (stroke plane). Este es el plano virtual que contiene el ala durante su movimiento periódico de batimiento.

El ciclo de batimiento puede ser dividido en cuatro fases (Dickinson et al., 1999; Singh et al., 2004): *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 2 se presenta un esquema con las diferentes fases explicadas anteriormente.

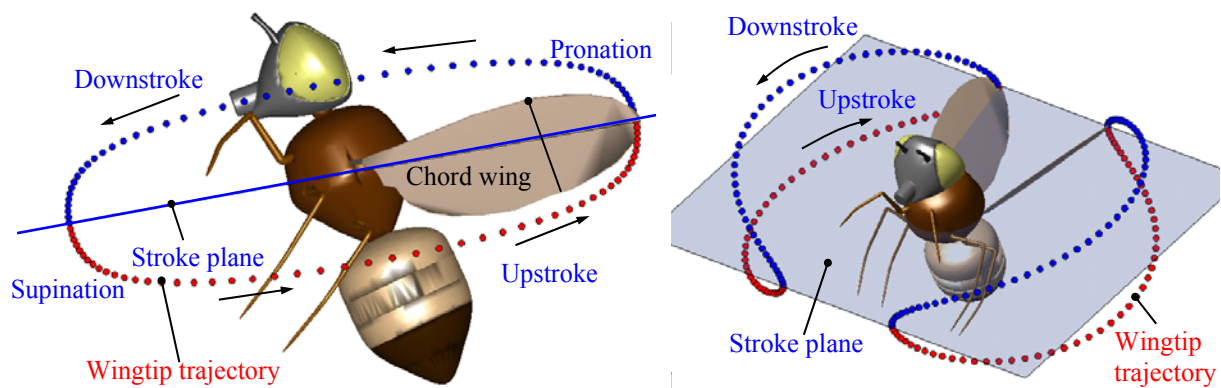


Figura 2: Fases de un ciclo de batimiento

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La geometría del modelo adoptado en este trabajo para estudiar la cinemática de alas batientes se basa en una mosca doméstica (*drosophila melanogaster*), dicho modelo se elaboró mediante el software de diseño SolidWorks®, (ver Figura 3).

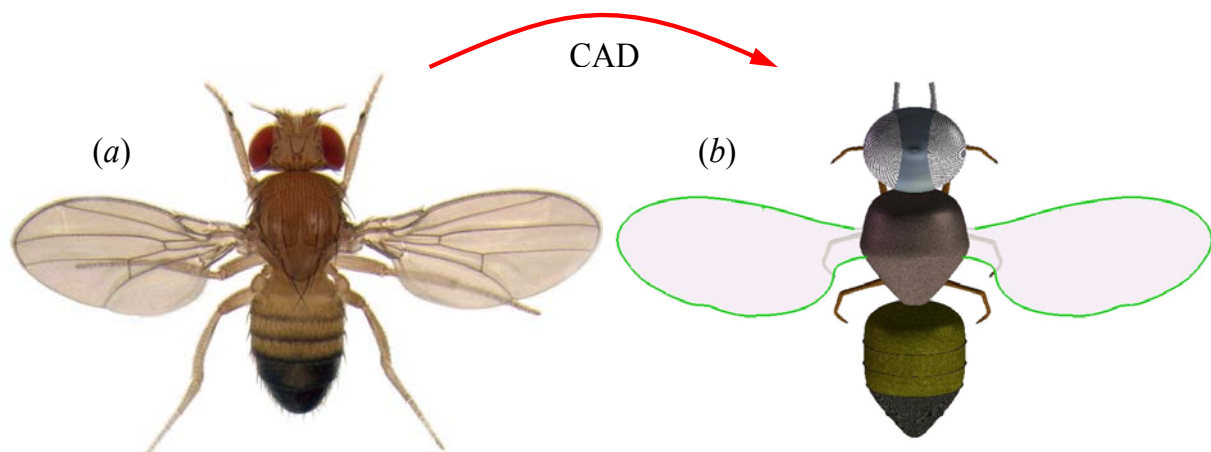


Figura 3: Geometría espacial del modelo adoptado: (a) Fotografía de una mosca doméstica real; (b) Modelo construido en SolidWorks®

La superficie mallada mostrada en la Figura 4 se obtuvo mediante una técnica de triangulación propia de SolidWorks® (3DFACE), esta permite exportar diseños de sólidos a formatos DXF para interactuar de esta forma con diferentes softwares de cálculo y diseño.

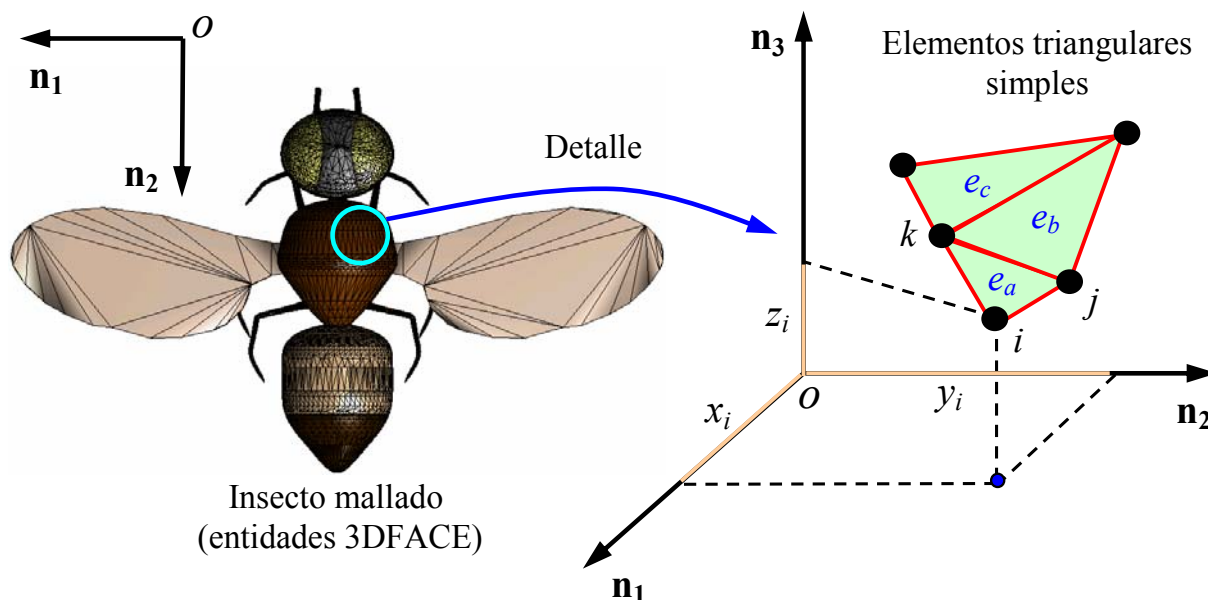


Figura 4: Mallado del insecto

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 interfase gráfica fue desarrollada íntegramente en MATLAB® mediante el uso del módulo GUIs (Graphical User Interfaces) (MathWorks, 2007). La malla que se utilizó para discretizar el insecto tiene 1902 nodos y 3796 elementos triangulares de tres nodos.

2.1 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 (Brodsky, 1994), *i*) el plano transversal, *ii*) el plano sagital, y *iii*) el plano frontal (ver Figura 5).

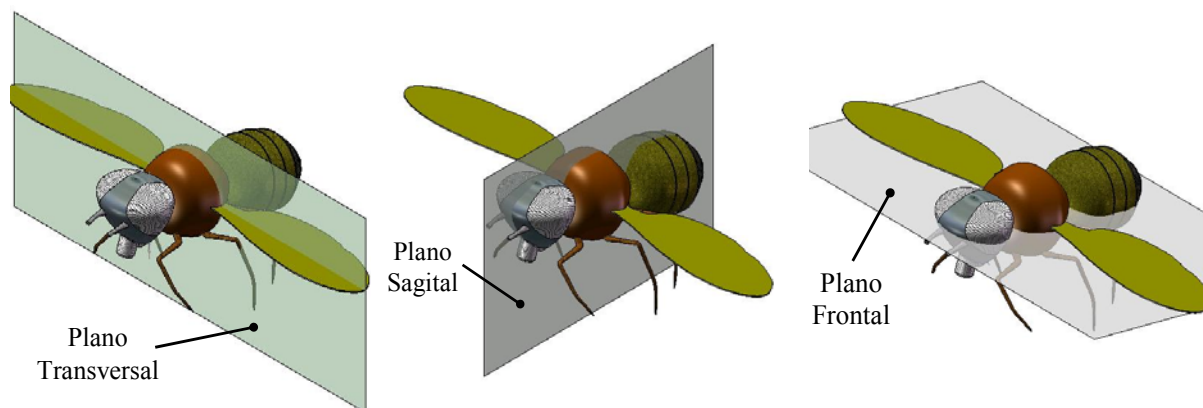


Figura 5: Planos utilizados para estudiar la morfología del insecto

El plano transversal divide al insecto en una porción anterior y otra porción posterior, el plano sagital lo divide en una mitad derecha y una mitad izquierda, y el plano frontal divide a la criatura en una parte dorsal y otra parte ventral. El movimiento espacial del ala se puede estudiar analizando las diferentes proyecciones de trayectorias de puntos contenidos en el ala sobre cada uno de estos planos. En particular, si el movimiento del ala es analizado en el plano sagital, se observaría que la misma deja de moverse hacia el final del downstroke y el upstroke, estos puntos separan el movimiento ascendente del movimiento descendente. En estos instantes de tiempo (en realidad el ala no deja de moverse) para estudiar este cambio de dirección es necesario proyectar el movimiento del ala en otro plano, por ejemplo el plano frontal, el cual se obtiene al rotar 90° el plano sagital respecto del eje longitudinal del insecto.

2.2 Sistemas de referencia

Los sistemas de referencia comúnmente utilizados para estudiar el movimiento del ala de algunos insectos voladores son tres (Ellington, 1984b; Vanella et al., 2005; Valdez et al., 2006): *i)* Un sistema de referencia fijo al cuerpo; *ii)* un sistema de referencia fijo al plano de aleteo; y *iii)* un sistema de referencia fijo a la tierra o inercial. 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 $\mathbf{N}=(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3)$; *ii)* un sistema fijo al cuerpo del insecto, ubicado en el centro de masa del tórax $\mathbf{T}=(\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \mathbf{t}_3)$; *iii)* un sistema fijo al plano de aleteo $\mathbf{Z}=(\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \mathbf{z}_3)$; y *iv)* un sistema fijo al ala del insecto para facilitar la discretización espacial de la misma, sobre el ala izquierda $\mathbf{B}=(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3)$ y sobre el ala derecha $\mathbf{A}=(\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3)$, (ver Figura 6a).

El plano de aleteo se define mediante tres puntos: la base del ala (la cual se ubica en el punto de articulación entre el ala y el cuerpo del insecto), la posición de la punta del ala en su máxima amplitud de aleteo, y la posición de la punta del ala en su mínima amplitud de aleteo (ver Figura 6b).

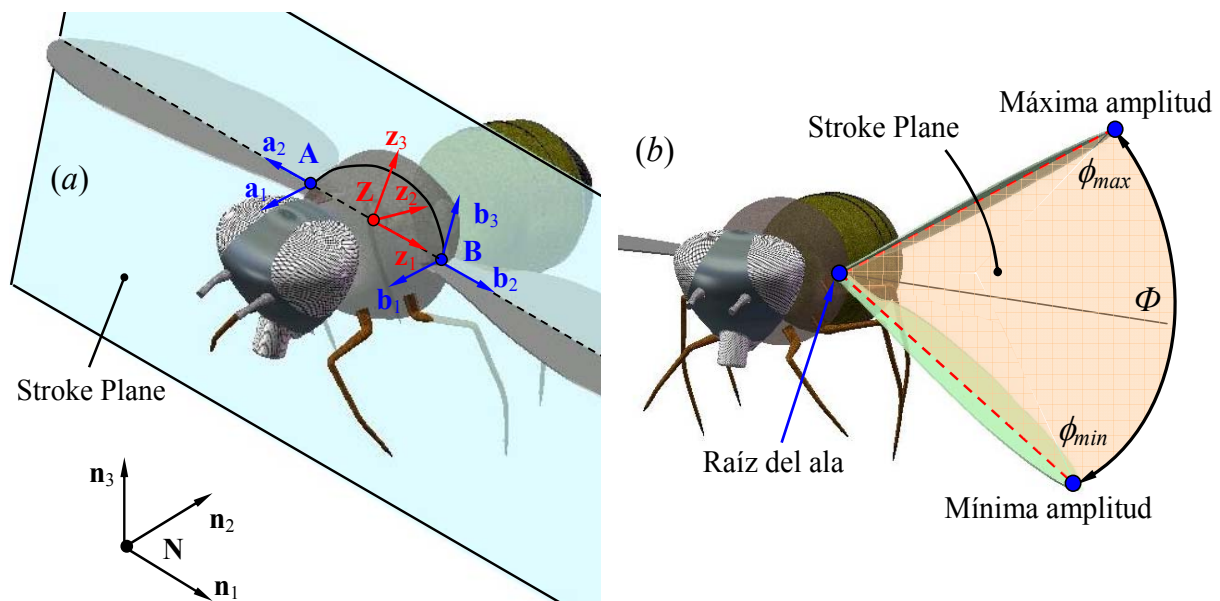


Figura 6: (a) Definición de los sistemas de referencia; (b) Definición del plano de aleteo (stroke plane)

3 PARÁMETROS CINEMÁTICOS

El movimiento del cuerpo y de las alas de un insecto está caracterizado por un conjunto de variables denominadas “stroke parameters”. Marey (1869) fue la primera persona en investigar el movimiento del ala de un insecto volador y descubrió que para ciertos valores de estos parámetros la punta del ala sigue una trayectoria cerrada conocida con el nombre de “figura del ocho”. Este tipo de movimiento es común en el vuelo animal y es tomado como punto de partida en numerosas publicaciones sobre el tema. A continuación se describen los principales parámetros cinemáticos que influyen tanto en el tipo de vuelo adoptado por los insectos (“hover”, “forward flight”, etc.) como así también en el movimiento de las alas a lo largo de un ciclo completo de aleteo (Shyy, 2008).

3.1 Ángulo de inclinación del cuerpo (body angle)

El “body angle” no está directamente relacionado con el movimiento de las alas, pero es de vital importancia para entender la naturaleza del batimiento de las mismas. Este ángulo cambia en varias etapas del vuelo debido a las oscilaciones en las fuerzas de sustentación y de arrastre. Hacia el final del downstroke el ángulo de inclinación del cuerpo se incrementa y hacia el final del upstroke sufre un decremento (Brodsky, 1994).

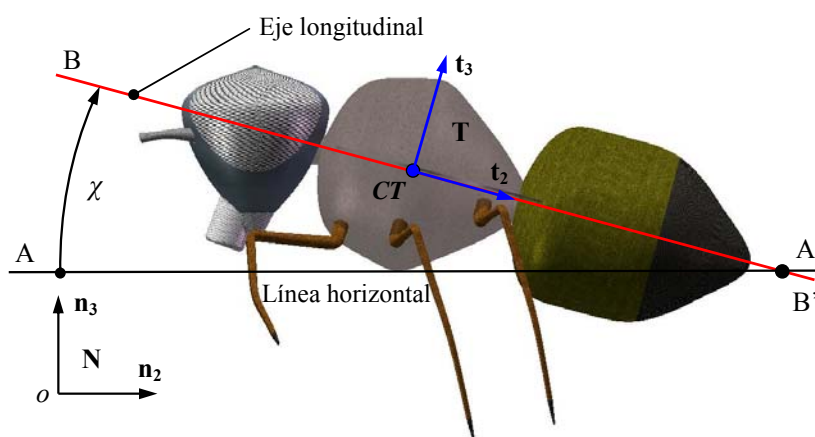


Figura 7: Definición del “body angle”

El ángulo de inclinación del cuerpo, χ , se define como el ángulo que forma el eje longitudinal del cuerpo del insecto $\overline{BB'}$ con la línea horizontal $\overline{AA'}$ (ver Figura 7). Este ángulo es positivo cuando la pendiente de la recta $\overline{BB'}$ es negativa.

3.2 Ángulo del plano de aleteo (stroke plane angle)

En la literatura existen varias definiciones para este ángulo. Una de ellas lo establece como el ángulo, ξ , que forma el plano de aleteo con el eje vertical $\overline{CC'}$ que pasa a través del centro de masa del cuerpo del insecto. Otros autores lo definen como el ángulo, η , que forma el plano de aleteo y el eje longitudinal del cuerpo de la criatura. Esta última definición tiene ciertas ventajas ya que revela las condiciones en las que trabaja la articulación cuerpo-ala (Brodsky, 1994) (ver Figura 8a).

La habilidad de cambiar este ángulo se ve disminuida en los insectos cuya frecuencia de batimiento es baja, oscilando el mismo entre 70° y 100° . Por el contrario, aquellos insectos que mueven sus alas con una alta frecuencia pueden variar fácilmente la orientación de dicho plano; por ejemplo, cualquier maniobra en vuelo que realice una *Diptera* es acompañado por un significativo cambio en el “stroke plane angle”.

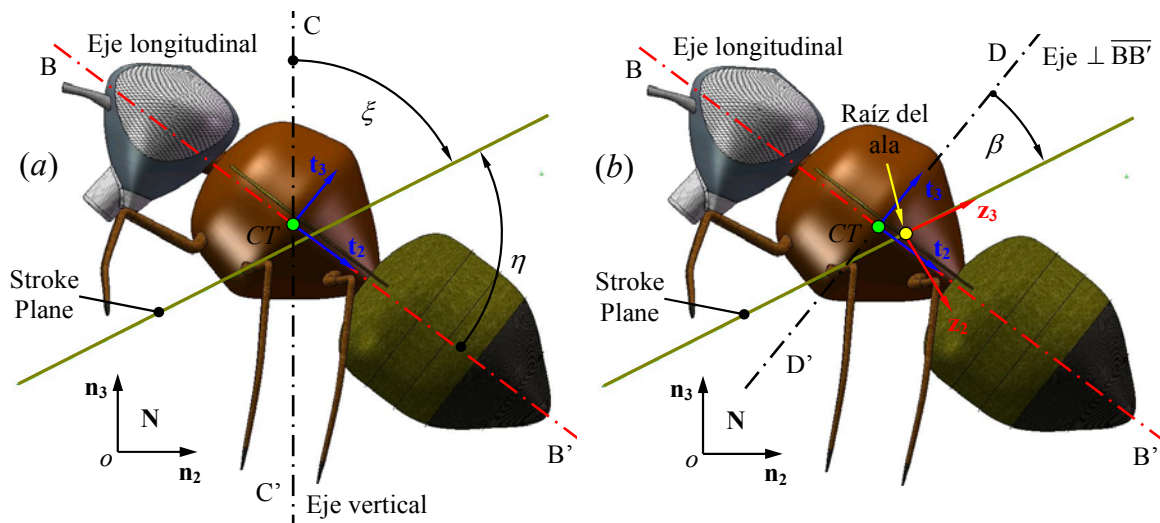


Figura 8: Definición del “Stroke plane angle” (a) ξ , ángulo medido respecto del eje vertical, y η medido respecto del eje longitudinal del insecto; (b) Definición del “stroke plane angle” respecto de un eje perpendicular al eje longitudinal de la criatura

Para realizar estudios aerodinámicos es conveniente medir el “stroke plane angle” relativo a la dirección de vuelo, la cual coincide con la línea horizontal en caso de “forward flight”. La herramienta numérica desarrollada en este trabajo mide el ángulo del plano de aleteo, β , respecto de un eje $\overline{DD'}$ perpendicular al eje longitudinal del insecto (ver Figura 8b). Este tipo de definición facilita la implementación de ángulos de Euler como parámetros cinemáticos que permiten describir la orientación instantánea del ala durante un ciclo de batimiento.

3.3 Ángulo de posición del ala dentro del plano de aleteo (stroke position angle)

El ángulo formado por la proyección del eje longitudinal del ala sobre el plano de batimiento, cuando la misma alcanza su máxima y mínima amplitud dentro del plano de batimiento se denomina “stroke angle”, Φ , (ver Figura 6). El mismo varía considerablemente entre diferentes especies de insectos y alcanza su valor más grande en aquellas criaturas que utilizan determinados mecanismos aerodinámicos como por ejemplo la técnica de aplauso y separación “clap and fling” (Bennett, 1977; Weis-Fogh, 1973; Ellington, 1984c, 1999; Sane, 2003).

El ángulo de posición del ala dentro del plano de aleteo “stroke position angle”, $\phi(t)$, es el ángulo formado por la proyección del eje longitudinal del ala sobre el plano de batimiento y la dirección positiva del versor \mathbf{z}_1 . Este ángulo es positivo cuando el ala se encuentra en la posición dorsal, y es negativo cuando el ala se encuentra en la posición ventral (ver Figura 9).

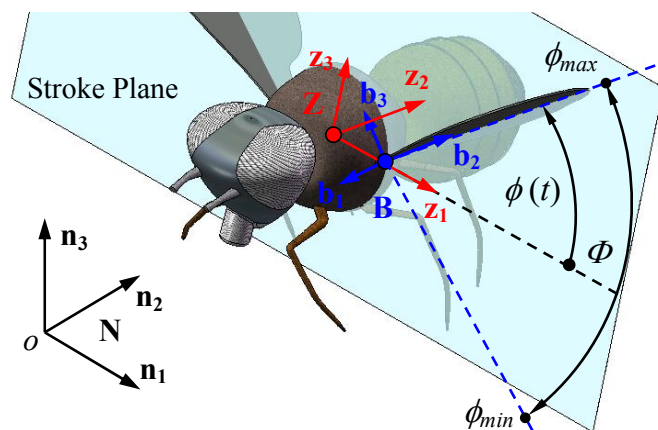


Figura 9: Definición del ángulo de posición, $\phi(t)$

3.4 Ángulo de desviación del ala respecto del plano de aleteo (stroke deviation angle)

Numerosos experimentos han demostrado que el movimiento del ala no está confinado sólo al plano de aleteo, sino que se desvía considerablemente de dicho plano. El ángulo que mide esta desviación se denomina “stroke deviation angle”, $\theta(t)$. Este es el ángulo formado por el eje longitudinal del ala y el plano de batimiento y se considera positivo cuando el ala se encuentra por encima del plano de aleteo y negativo en el caso contrario (ver Figura 10).

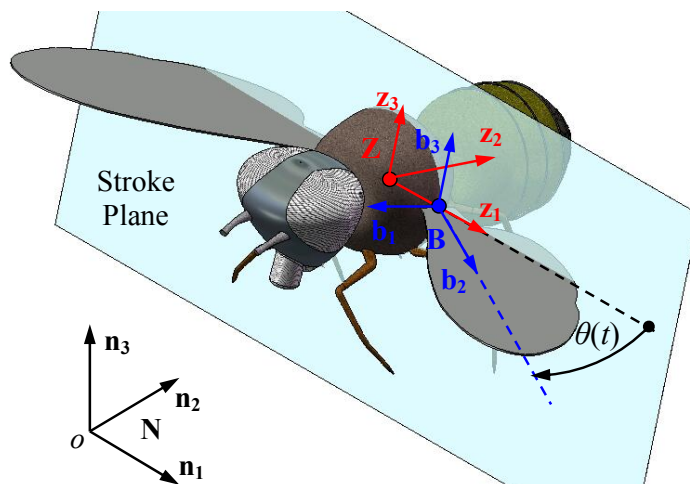


Figura 10: Definición del ángulo de desviación, $\theta(t)$

3.5 Ángulo de rotación (rotation angle)

El ángulo que especifica la rotación del ala respecto de su eje longitudinal, $\psi(t)$, se mide sobre un plano, Π , perpendicular al vector “ \mathbf{b}_2 ”, fijo al ala, y se define como el ángulo que forman la cuerda del ala y la recta $\overline{EE'}$ (ver Figura 11). Este ángulo es positivo cuando el ala se encuentra en la etapa del ciclo correspondiente al downstroke y negativo durante el upstroke.

Existe otra definición para este ángulo que considera el ángulo formado por la cuerda del ala y el plano de aleteo, $\alpha_{sp}(t)$. Esta manera de medir el ángulo de rotación fue utilizada en numerosos trabajos, en particular por Willmott (1997) quien utilizó cámaras de alta velocidad para determinar la cinemática del cuerpo y de la punta del ala de una mariposa en hover. Posteriormente Valdez (2006) implementó dicha cinemática para simular algunos mecanismos aerodinámicos no estacionarios y altamente no lineales característicos del vuelo con alas batientes.

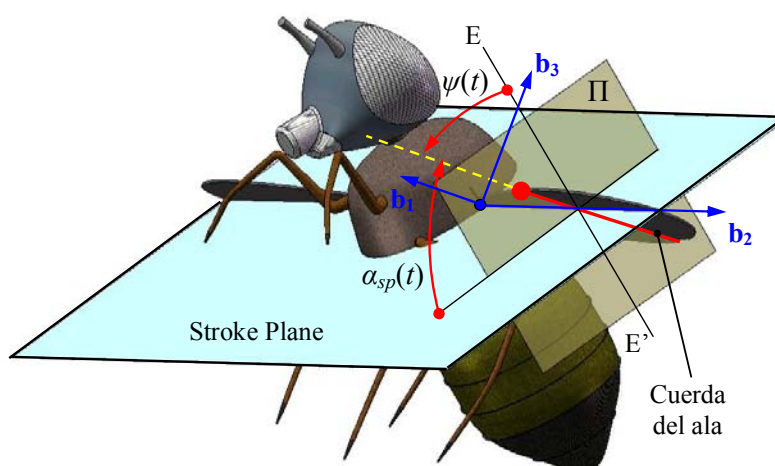


Figura 11: Definición del ángulo de rotación, $\psi(t)$

4 TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS

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

- 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 $\phi(t)$, $\theta(t)$, y $\psi(t)$ previamente definidos.

4.1 Orientación del insecto

La orientación del insecto en el espacio es afectado solamente por un cambio en el “body angle”, χ , y se obtiene mediante una rotación (1–rotación) del marco de referencia \mathbf{T} fijo al cuerpo de la criatura alrededor del eje \mathbf{n}_1 . Esta rotación está descrita matemáticamente por la siguiente matriz perteneciente a $SO(3)$,

$$\left[\mathbf{T}_{TN(-\chi)} \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \chi & -\sin \chi \\ 0 & \sin \chi & \cos \chi \end{bmatrix} \quad (1)$$

4.2 Orientación del plano de aleteo

La orientación del plano de aleteo respecto del marco inercial \mathbf{N} se realiza en dos etapas: primero se ubica el plano de aleteo en forma perpendicular al eje longitudinal del insecto mediante el body angle, y posteriormente se orienta el plano de aleteo respecto de un eje perpendicular al eje longitudinal de la criatura mediante el stroke plane angle, β , la Figura 12 muestra la secuencia de rotaciones,

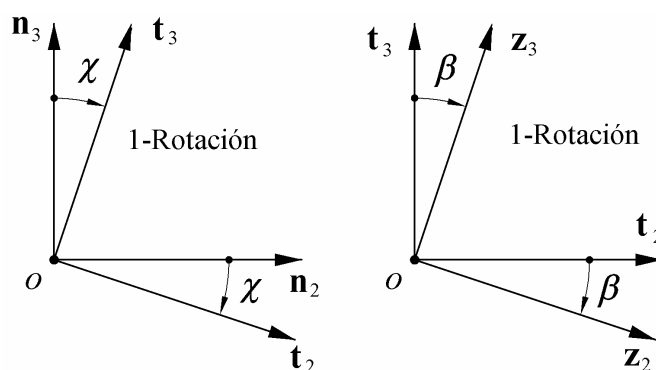


Figura 12: Secuencia de rotaciones para obtener la orientación del plano de aleteo

Cada rotación tiene asociada una matriz ortogonal de rotación, de modo tal que la secuencia descrita en la Figura 12 puede escribirse como el siguiente producto matricial (Baruh, 1999),

$$\left[\mathbf{T}_{ZN} \right] = \left[\mathbf{T}_{ZT(-\beta)} \right] \left[\mathbf{T}_{TN(-\chi)} \right] \quad (2)$$

donde,

$$[\mathbf{T}_{ZN}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta \cos \chi - \sin \beta \sin \chi & -\sin \chi \cos \beta - \sin \beta \cos \chi \\ 0 & \sin \beta \cos \chi + \sin \chi \cos \beta & \cos \beta \cos \chi - \sin \beta \sin \chi \end{bmatrix} \quad (3)$$

4.3 Orientación del ala

Previo a la secuencia de rotaciones (1–3–2) dadas por los ángulos de Euler $\phi(t)$, $\theta(t)$, y $\psi(t)$ para orientar el ala respecto del marco \mathbf{Z} fijo al plano de aleteo, se realiza una transformación del sistema \mathbf{Z} a un marco intermedio \mathbf{W} , dada por una 3–rotación de $\delta = 90^\circ$ respecto del eje coincidente con el versor \mathbf{z}_3 .

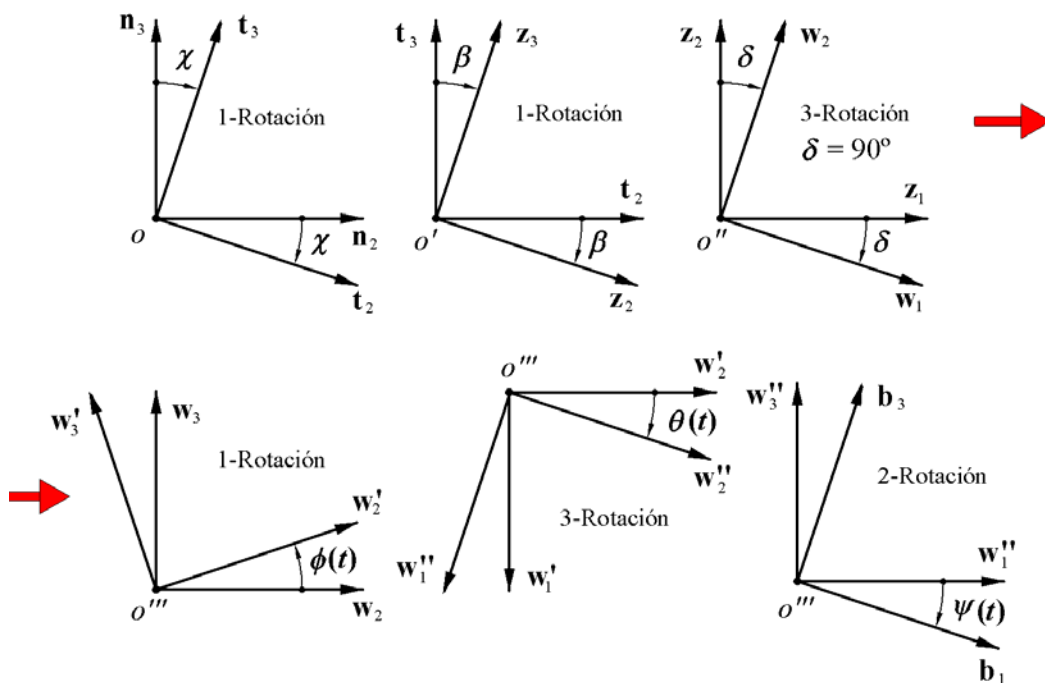


Figura 13: Secuencia de rotaciones para obtener la orientación del ala izquierda

La secuencia de rotaciones mostrada en la Figura 13 se puede representar matemáticamente de la siguiente manera,

$$[\mathbf{T}_{BN}] = [\mathbf{T}_{BW''(\psi(t))}] [\mathbf{T}_{W''W'(-\theta(t))}] [\mathbf{T}_{W'W(\phi(t))}] [\mathbf{T}_{WZ(\delta=90)}] [\mathbf{T}_{ZT(-\beta)}] [\mathbf{T}_{TN(-\chi)}] \quad (4)$$

donde,

$$[\mathbf{T}_{BW''(\psi(t))}] = \begin{bmatrix} \cos \psi(t) & 0 & -\sin \psi(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi(t) & 0 & \cos \psi(t) \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{T}_{W''W'(-\theta(t))}] = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & -\sin \theta(t) & 0 \\ \sin \theta(t) & \cos \theta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[\mathbf{T}_{W'W(\phi(t))}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi(t) & \sin \phi(t) \\ 0 & -\sin \phi(t) & \cos \phi(t) \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{T}_{WZ(\delta=90)}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5 VELOCIDADES Y ACELERACIONES

En este esfuerzo, las expresiones de las velocidades y aceleraciones de puntos materiales contenidos en el ala se expresan en términos del sistema **B** fijo al ala.

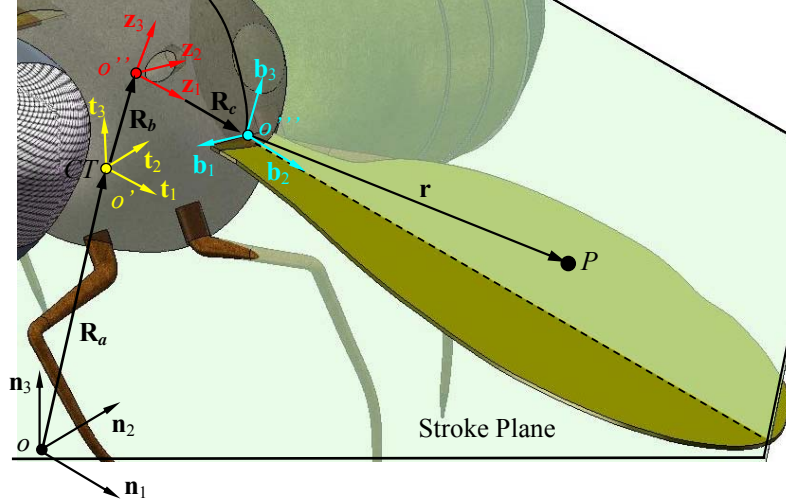


Figura 14: Vector posición de un punto genérico *P* sobre el ala

El vector posición de un punto material contenido en el ala (ver Figura 14) está dado por,

$$\{ \mathbf{R}_p \} = \{ \mathbf{R}_a \} + \{ \mathbf{R}_b \} + \{ \mathbf{R}_c \} + \{ \mathbf{r} \} \tag{6}$$

donde los vectores $\{ \mathbf{R}_a \}$, $\{ \mathbf{R}_b \}$ y $\{ \mathbf{R}_c \}$ no cambian con el tiempo.

En este trabajo solo expondremos la expresión final para la velocidad y la aceleración de un punto arbitrario *P* sobre el ala. El lector puede derivar dichas fórmulas siguiendo el procedimiento descrito en (Roccia et al., 2007).

El vector velocidad angular del marco **B** respecto del marco inercial **N** es calculado mediante el teorema de adición (Kane, 1968) empleando los sistemas de referencia intermedios definidos en la Figura 13. Teniendo en cuenta la secuencia de ángulos de Euler presentada anteriormente se tiene,

$$\{ {}^N \boldsymbol{\omega}^B \} = -\dot{\chi} \mathbf{t}_1 - \dot{\beta} \mathbf{z}_1 + \dot{\phi} \mathbf{w}'_1 - \dot{\theta} \mathbf{w}''_3 + \dot{\psi} \mathbf{b}_2 \tag{7}$$

Debido a que el “body angle”, χ , y el “stroke plane angle”, β , no cambian con el tiempo la ecuación (7) se simplifica de la siguiente manera,

$$\{ {}^N \boldsymbol{\omega}^B \} = \dot{\phi} \mathbf{w}'_1 - \dot{\theta} \mathbf{w}''_3 + \dot{\psi} \mathbf{b}_2 \tag{8}$$

La velocidad angular resuelta en términos del sistema de referencia **B**, está dada por,

$$\{ {}^N \boldsymbol{\omega}^B \}_B = [\mathbf{T}_{(\theta, \psi)}] \{ \dot{\mathbf{n}}_B \} = \omega_1 \mathbf{b}_1 + \omega_2 \mathbf{b}_2 + \omega_3 \mathbf{b}_3 \tag{9}$$

donde

$$[\mathbf{T}_{(\theta, \psi)}] = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi & 0 \\ \sin \theta & 0 & 1 \\ \cos \theta \sin \psi & -\cos \psi & 0 \end{bmatrix}, \quad \text{y} \quad \{ \dot{\mathbf{n}}_B \} = \begin{Bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} \tag{10}$$

Finalmente, 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,

$$\{\mathbf{V}_P^N\}_B = \frac{^N d}{dt} \{\mathbf{R}_P\} = \{^N \boldsymbol{\omega}^B\}_B \times \{\mathbf{r}\}_B \quad (11)$$

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,

$$\{\mathbf{A}_P^N\}_B = \frac{^N d^2}{dt^2} \{\mathbf{R}_P\} = \{^N \boldsymbol{\alpha}^B\}_B \times \{\mathbf{r}\}_B + \{^N \boldsymbol{\omega}^B\}_B \times \{^N \boldsymbol{\omega}^B\}_B \times \{\mathbf{r}\}_B \quad (12)$$

donde $\{^N \boldsymbol{\alpha}^B\}_B$ es la aceleración angular, expresada en el sistema \mathbf{B} , del marco de referencia \mathbf{B} respecto del marco inercial de referencia \mathbf{N} .

6 SIMULACIONES NUMÉRICAS

El software desarrollado en este esfuerzo tiene una rutina de preprocesamiento capaz de interpolar datos discretos provenientes de mediciones experimentales de la cinemática de insectos. El núcleo del código computacional, el cual calcula la posición y orientación del ala en cada instante a lo largo de un ciclo de batimiento fue validado con anterioridad (Roccia et al., 2007).

6.1 Señales de entrada

En este trabajo la historia en el tiempo de los ángulos ϕ , θ , y ψ proviene de cuatro modelos diferentes para las señales de entrada, (ver Figura 15),

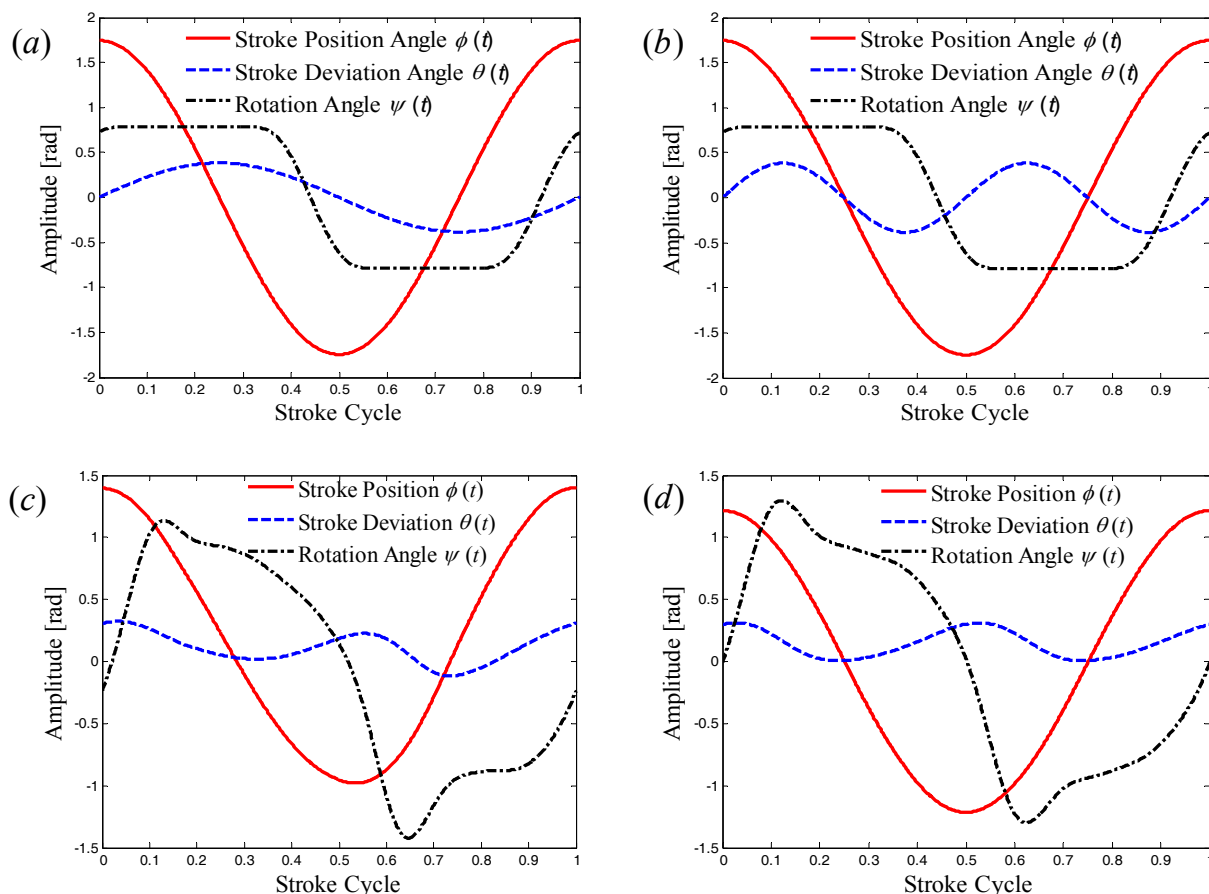


Figura 15: Señales de entrada

Las señales que se muestran en la Figura 15a y 15b son las implementadas por Dickinson (2001) en su estudio sobre un modelo mecánico a escala de una *drosophila melanogaster*. Estas dos señales difieren únicamente en el hecho de que utilizan dos funciones diferentes para generar el ángulo de desviación, $\theta(t)$:

- i. un patrón en forma de cero: el ala se desvía del plano de aleteo siguiendo un ciclo de una función seno por cada ciclo de batimiento (Figura 15a), y
- ii. un patrón en forma de ocho: el ala se desvía del plano de aleteo siguiendo dos ciclos completos de una función seno por cada ciclo de batimiento (Figura 15b).

El modelo mostrado en la Figura 15c es una representación real de la cinemática de una mosca doméstica en “hovering” (Bos et al., 2007). Finalmente, el cuarto modelo (Figura 15d) es una versión ligeramente simplificada de la anterior. Estos modelos son escalados dinámicamente con el fin de obtener números de Reynolds bajos, característicos del vuelo de este tipo de criaturas. Por razones de espacio las simulaciones numéricas presentadas en este trabajo concerniente a las trayectorias de puntos materiales distribuidos sobre el ala a lo largo de un ciclo de batimiento corresponden solamente a la cinemática real de una mosca mostrada en la Figura 15c.

6.2 Parámetros morfológicos y discretización del ala

La interfase gráfica implementada permite seleccionar puntos arbitrarios distribuidos sobre el ala para analizar y visualizar tanto sus trayectorias 3D y sus proyecciones 2-D sobre los planos descritos en la sección 2.1, como así también la velocidad y aceleración a lo largo de un ciclo de batimiento. El punto seleccionado en este trabajo para llevar a cabo este análisis se puede observar en la Figura 16b marcado en color rojo, y corresponde a la punta del ala (wingtip).

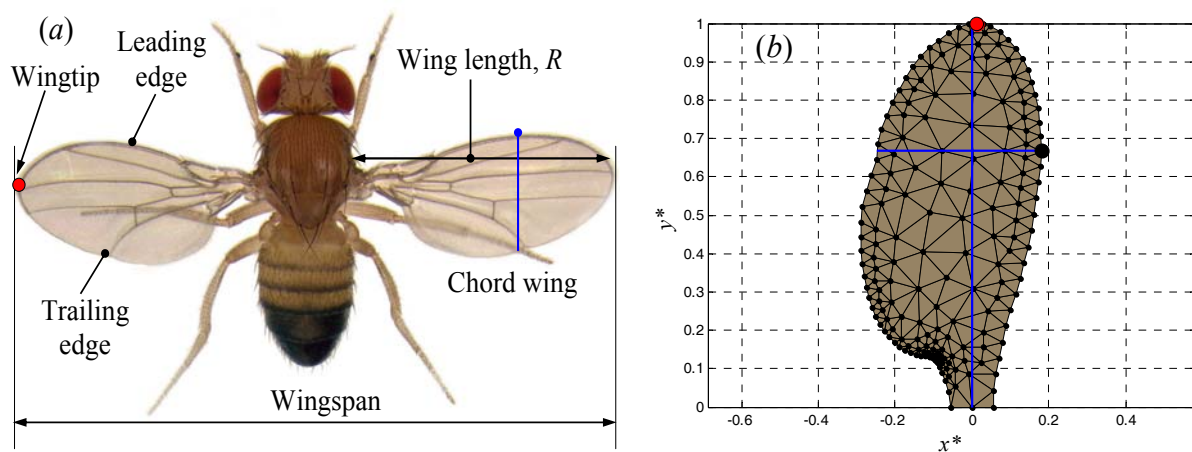


Figura 16: (a) Definición de parámetros morfológicos; (b) Discretización del ala

Las variables adimensionales y^* y x^* están definidas en función de la envergadura del ala (wing length), R . Esto es:

$$x = R x^*, \quad y = R y^* \quad (13)$$

Para llevar a cabo simulaciones numéricas que representen el movimiento real de las alas de un insecto durante un ciclo de batimiento es necesario conocer ciertos parámetros morfológicos de la criatura, como por ejemplo, la envergadura del ala, R , la frecuencia de batimiento, n_f , y la superficie del ala, A_w (Zanker, 1990a, 1990b; Ellington, 1984a). En la Tabla 1 se presentan los principales parámetros morfológicos del ala de una mosca doméstica (*drosophila melanogaster*).

<i>Drosophila Melanogaster</i>	
Envergadura, R [mm]	2.47 ± 0.02
Frecuencia de batimiento, n_f [Hz]	200 ± 10
Área del ala, A_w [mm ²]	2.180 ± 0.02
Masa del ala, m_{wg} [μ g]	5.00
Amplitud de oscilación, Φ	160°

Tabla 1: Parámetros morfológicos del ala de una *Drosophila Melanogaster*

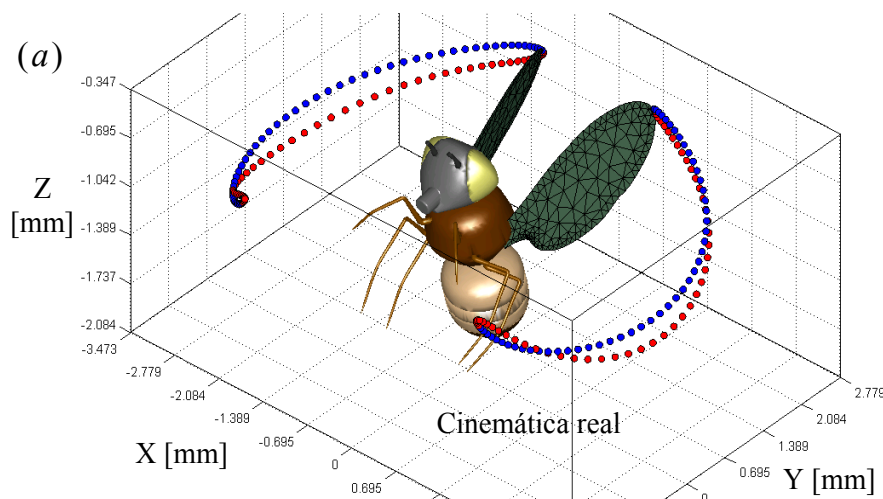
La masa del ala, m_{wg} , se utiliza para realizar un análisis de la distribución del corte y momento flector sobre un modelo dinámico simplificado del ala.

6.3 Trayectoria 3D y 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”. Este tipo de vuelo fue extensivamente estudiado por Weis-Fogh (1972, 1973) quien caracterizó los patrones normales de “hovering”.

Los puntos en color azul, utilizados para describir la trayectoria de la punta del ala en el espacio 3D, corresponden 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 17b) 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 (Roccia, 2007, 2008). Por razones de espacio no se presentan las trayectorias de otros puntos distribuidos sobre el ala.

La protuberancia “bump” extra en el ángulo de rotación (ver Figura 15c), 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, elevando, de esta manera, la performance aerodinámica del insecto.



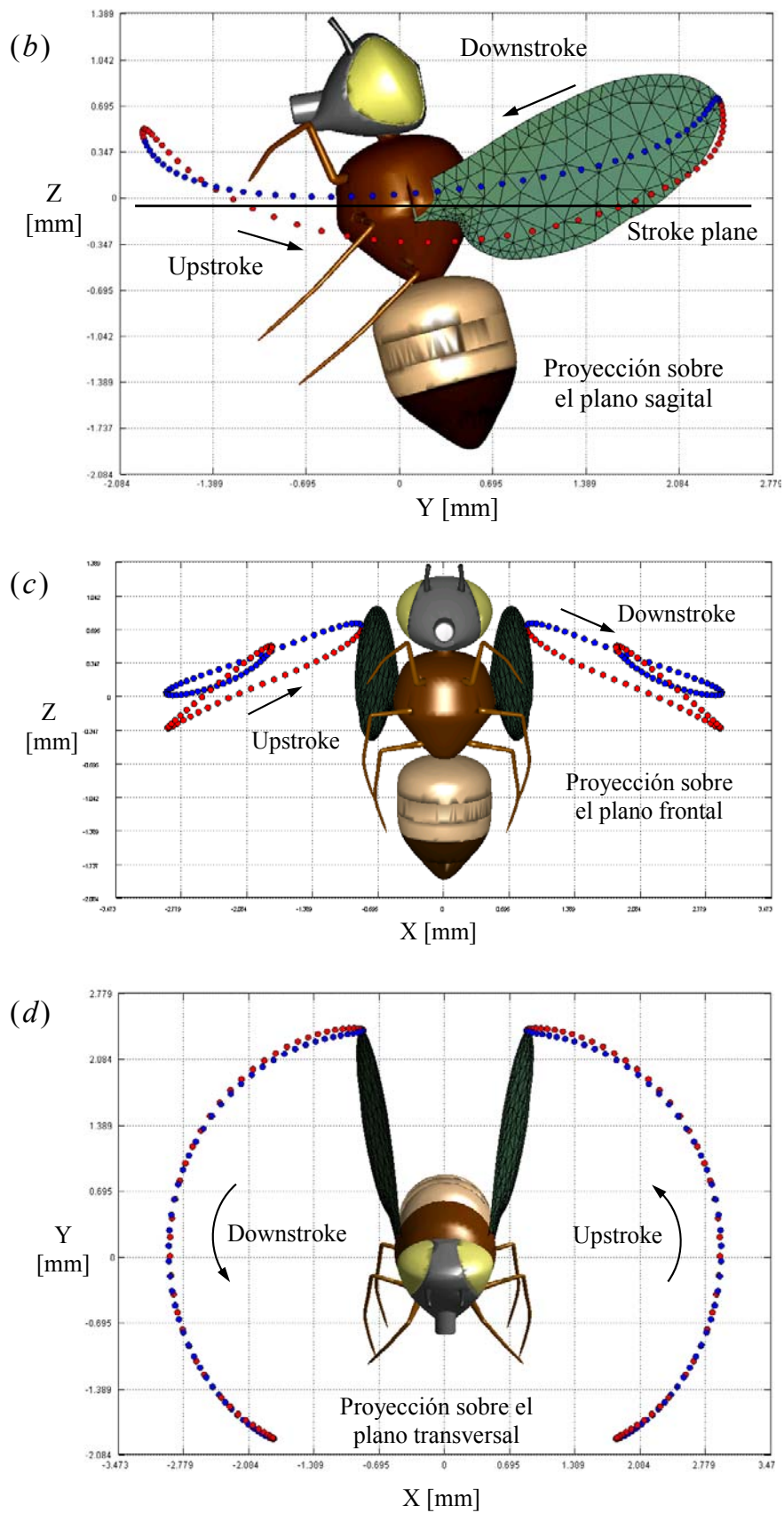


Figura 17: Trayectoria de la punta del ala en un ciclo de batimiento; (a) Trayectoria 3D de la punta del ala; (b) Proyección 2D sobre el plano sagital; (c) Proyección 2D sobre el plano frontal; (d) Proyección 2D sobre el plano transversal

6.4 Velocidad y aceleración de la punta del ala

El programa desarrollado cuenta con una rutina que determina en forma numérica la velocidad y aceleración de los diferentes puntos materiales contenidos en el ala. En la Figura 18 se grafica el módulo de la velocidad y el módulo de la aceleración de la punta del ala.

Los cambios bruscos en la velocidad y aceleración que se observan en la Figura 18 hacia el final de cada half-stroke (donde el ala cambia rápidamente la dirección de su movimiento) tienen una gran influencia sobre las fuerzas de sustentación producidas por la rotación del ala respecto de su eje longitudinal (rotational lift) (Dickinson et al., 1999) y sobre las fuerzas generadas debido a la captura de la estela (wake capture). Estos mecanismos aerodinámicos inestacionarios dependen explícitamente de la fase rotacional del ciclo de batimiento (pronation y supination) e interactúan con mecanismos tales como el retraso de la pérdida dinámica (delayed stall) que depende, básicamente, de la fase de traslación del ala. Por otro lado, es de vital importancia conocer las trayectorias, velocidades y aceleraciones de diferentes puntos materiales pertenecientes al ala para intentar efectuar un correcto análisis dinámico y aerodinámico del vuelo de insectos.

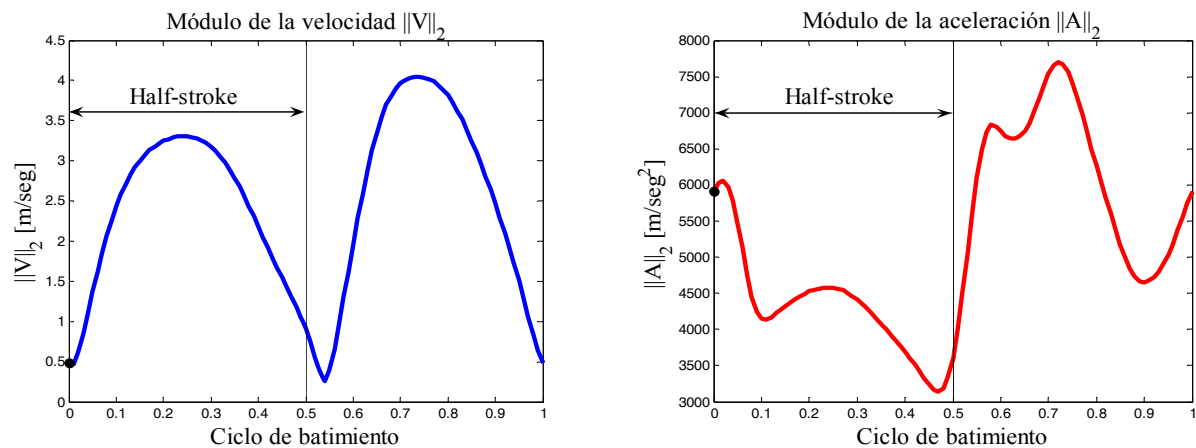


Figura 18: Módulo de la velocidad y aceleración de la punta del ala

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una herramienta computacional interactiva que permite estudiar y visualizar la compleja cinemática asociada a las alas de insectos. 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 si 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 modulo 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 iniciar un primer análisis aerodinámico del movimiento de las alas de un insecto a lo largo de un ciclo de batimiento. En un futuro se pretende incorporar al programa el calculo del corte y del momento flector sobre un modelo 2D de las alas, y dotar las mismas con propiedades elásticas para de esta forma estudiar como 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

- Baruh H., *Analytical dynamics*. McGraw Hill, 1999.
- Bennett L., Clap and fling aerodynamics – an experimental evaluation. *Journal of Experimental Biology*, 69:261-272, 1977.
- Bos F.M., Lentink D., van Oudheusden B.W. and Bijl H., Numerical study of kinematic wing models of hovering insect flight. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 1–18, 2007.
- Brodsky A.K., *The evolution of insect flight*. Oxford University Press Inc., New York, 1994.
- Dickinson M.H., Solving the mystery of insect flight. *Scientific American*, 284(6):48-57, 2001.
- Dickinson M.H., Lehmann F.O. and Sane S.P., Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. *Science*, 284:1954-1960, 1999.
- Ellington C.P., The aerodynamics of hovering insect flight. II. Morphological parameters. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 305(1122):17-40, 1984a.
- Ellington C.P., The aerodynamics of hovering insect flight. III. Kinematics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 305(1122):41-78, 1984b.
- Ellington C.P., The aerodynamics of hovering insect flight. IV. Aerodynamic mechanisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 305(1122):79-113, 1984c.
- Kane T.R., *Dynamics*. Holt, Rinehart and Winston Inc., 1968
- Marey C., Mémoire sur le vol des insectes et des oiseaux. *Ann. Sci. Nat. Zool.*, 5(12):49-150, 1969.
- MathWorks, *MATLAB® Creating Graphical User Interfaces*. The MathWorks, Inc., 2007.
- Osborne M.F., Aerodynamics of flapping flight with application to insects. *Journal of Experimental Biology*, 28:221-245, 1951.
- Roccia B.A., Preidikman S. y Massa J.C., Desarrollo de un Código Computacional para Simular y Analizar la Cinemática de Alas Batientes. *Revista Mecánica Computacional*, 26:3224-3245, 2007.
- Roccia B.A., Preidikman S. y Massa J.C., Una Herramienta Numérica para Simular y Analizar la Cinemática de Alas Batientes. *IX Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas CIMENICS*. AD 41-46, 2008.
- Sane S., The aerodynamics of insect flight. *The Journal of Experimental Biology*, 206:4191-4208, 2003.
- Shyy W., Lian Y. and Tang J., *Aerodynamics of low Reynolds number flyers*, Cambridge University Press, 2008.
- Singh B., Ramasamy M., Chopra I. and Leishman, J.G., Experimental studies on insect-based flapping wings for micro hovering air vehicles. *Alfred Gessow Rotorcraft Center, Department of Aerospace Engineering, University of Maryland at College Park, MD 20742*, 2004.
- Valdez M., Preidikman S. y Massa J., Aerodinámica de flujos bidimensionales e inestacionarios dominados por vorticidad. *Revista Mecánica Computacional*, 25:2333-2357, 2006.

- Vanella M., Preidikman S. y Massa J., 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. *Congreso Argentino de Tecnología Espacial*, 2005.
- Weis-Fogh T., Energetics of hovering flight in hummingbirds and in *Drosophila*. *Journal of Experimental Biology*, 56:79-104, 1972.
- Weis-Fogh T., Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production. *Journal of Experimental Biology*, 59:169-230, 1973.
- Willmott A.P. and Ellington C.P., The mechanics of flight in the hawkmoth *Manduca Sexta*. I. Kinematics of hovering and forward flight. *Journal of Experimental Biology*, 200:2705-2722, 1997.
- Zanker J.M., The wing beat of *Drosophila melanogaster* I. Kinematics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 327:1-18, 1990a.
- Zanker J.M., The wing beat of *Drosophila melanogaster* II. Dynamics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 327:19-44, 1990b.