

El patrón de exploración modula la percepción de longitudes a través del tacto dinámico

Lorena Lobo y David Travieso
Universidad Autónoma de Madrid

Una de las habilidades más sorprendentes del sistema háptico es su capacidad de realizar estimaciones de algunas propiedades de los objetos, como el peso o el tamaño, utilizando invariantes de la mecánica rotacional que son accesibles por medio del subsistema propioceptivo; este campo de investigación se denomina *tacto dinámico*. En un ejemplo clásico de este paradigma experimental, el participante sujeta una varilla en su mano, sin estar ésta a la vista, y trata de igualar el tamaño percibido usando otra varilla que puede ver pero no blandir. En este experimento analizamos el papel del comportamiento exploratorio en esta situación, restringiendo el balanceo de la varilla en seis condiciones que varían la frecuencia y amplitud de los movimientos. Los resultados muestran que con una mayor velocidad en los movimientos se incrementa el ajuste de las estimaciones hápticas. Por ello, se argumenta que el momento de inercia es el mejor candidato informacional al realizar la tarea, ya que es una propiedad invariante que emerge únicamente cuando se aplica fuerza y se realizan movimientos rotacionales con el objeto. Se descartan otros candidatos informacionales, como el momento estático, o la masa, dado que no dependen de movimientos diferenciales.

Exploration styles modulate length perception through dynamic touch. One of the most surprising capacities of the haptic system is the ability to estimate different properties of objects, like weight or length, through invariants of rotational mechanics that are accessible via the proprioceptive system. This field of research is called Dynamic Touch. In its classical experimental paradigm, the participant firmly grasps a rod that can be wielded but not seen, and he or she tries to match the hand-held rod's length using another rod that can be seen but not wielded. In the experiment reported here, we focus on the role of the exploratory behavior, restricting the wielding in six conditions that vary both the amplitude and the frequency of movements. Increments in the speed of the movement are shown to increase the accuracy in the haptic estimation. It is argued that these results support the moment of inertia as the best informational candidate, given that it is an invariant property that only emerges when rotational torques are applied. Alternative candidates such as static moment or mass are discarded because they do not depend on differential movements.

El tacto dinámico o cinestésico es un subsistema del tacto que nos permite acceder a propiedades de los objetos a través de la acción, para lo cual cuenta con la participación del esfuerzo muscular y sus consecuencias sensoriales (Jones y Lederman, 2006; Turvey, 1996). Así accedemos a la longitud, el peso, la anchura, la forma o la orientación de la mano y del objeto que se mueve (Turvey, 1996). El tacto dinámico es una unidad funcional en sí misma formada por conjuntos de músculos y tejidos que, durante la exploración de los objetos, son sensibles a la dinámica rotacional y los movimientos, detectando invariantes físicos (Gibson, 1966; Turvey, 1996).

Los experimentos sobre lo que hoy llamamos tacto dinámico tienen su origen en una línea de investigación sobre tacto que

inició Hoisington (1920) en los años veinte del siglo pasado. A Hoisington le interesaba estudiar cómo era posible percibir la longitud de una varilla sostenida por la mano en un único punto, sin estar accesible a la vista. La explicación actual de esta habilidad es la desarrollada por Solomon y Turvey (1988), que señalaron que el subsistema háptico es estimulado por variables mecánicas y, por tanto, la longitud como propiedad geométrica solo puede percibirse con estimulación mecánica al ser sujeta desde un único punto. Variables mecánicas son aquellas que combinan la masa del objeto con su volumen y los cambios que se generan en el tiempo sobre fuerzas y rotaciones.

Solomon y Turvey (1988) demostraron en una serie experimental que el subsistema háptico detecta el tensor de inercia de un objeto al establecer una relación lineal entre la longitud percibida y la longitud real. El invariante informacional utilizado para realizar las estimaciones sería, pues, el tensor de inercia, definido como la resistencia de un objeto a ser rotado.

De manera breve, el tensor de inercia permite establecer las relaciones entre la fuerza aplicada para conseguir la rotación (momento de fuerza) y la aceleración (angular) producida. Es decir, es

el equivalente a la masa en la expresión $F = M \cdot a$, donde F es la fuerza, m la masa y a la aceleración, pero aplicada a la mecánica rotacional. Su ecuación equivalente sería $\tau = I \cdot \alpha$, donde τ es el momento de una fuerza, I el momento de inercia y α la aceleración angular. Matemáticamente, el tensor de inercia (Giancoli, 2008) se expresa en términos de una matriz simétrica cuya diagonal son los principales momentos de inercia (cuyas unidades son $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$) para los tres ejes perpendiculares más tres productos de inercia simétricos que son las componentes de esa combinación de los ejes (I_{xy} , I_{xz} , I_{yz} , etc.). Para simplificar el tensor, se utiliza un eje principal (ortogonal) de transformación para eliminar los productos de inercia y así reducir el tensor I a la forma diagonal, es decir, con tres valores que serían los momentos principales de inercia en cada uno de los ejes (I_{xx} , I_{yy} e I_{zz}). Si, además, la varilla es cilíndrica, I_{xx} e I_{yy} son iguales. Por último, I_{zz} es un valor pequeño en comparación con la longitud de la varilla y, por tanto, con I_{xx} , así que explica poco de la propiedad percibida, por lo que finalmente el candidato informacional se puede expresar mediante el valor de I_{xx} . A I_{xx} también se le conoce como momento principal de inercia o segundo momento en la geometría de masas. Se expresaría como el sumatorio de la masa distribuida en el objeto por el cuadrado de la distancia entre el punto de rotación y cada punto de esa distribución de masas (ecuación 1):

$$I = \sum m_i \cdot r_i^2 \quad (1)$$

El primer momento es el momento estático (M), que se expresaría como el sumatorio de la masa distribuida en el objeto por la distancia entre el punto de rotación y cada punto de esa distribución de masas (ecuación 2):

$$Me = \sum m_i \cdot r_i \quad (2)$$

Por último, la masa se conoce como momento cero, puesto que sería el resultado si las ecuaciones anteriores elevaran la distancia a cero. Evidentemente, los tres invariantes, masa, momento estático y momento de inercia, tienen una correlación igual a uno cuando se calculan sobre una misma varilla uniforme.

Solomon y Turvey (1988) señalaron que la exploración háptica era una manera de realizar la diagonalización del tensor de inercia funcionalmente, de forma que los movimientos de «balanceo» separarían así las propiedades permanentes del objeto de los cambios. No se eliminan los productos de inercia, sino que se separan de los momentos de inercia que se constituirían como invariantes por medio de movimientos sobre los ejes principales del objeto.

Sin embargo, Kingma y cols. (2002, 2004) destacan que el momento principal de inercia no es el único candidato posible en la estimación de longitudes. Así, afirman que hay que considerar otros candidatos como el momento estático (M), la masa (m) o I_{zz} . Como se ha señalado antes, tanto el momento estático, como el momento de inercia, son expresiones matemáticas del producto de la distancia por la masa. Kingma y cols. (2002, 2004) argumentan que es necesario romper la covariación para observar qué candidato utilizamos, para lo cual llevaron a cabo una serie experimental en la que usaron conjuntos de varillas en los que mantenían constante I_{xx} o M . Tomando los datos en conjunto, el mejor candidato parecía ser I_{xx} cuando se utilizaba un modelo de un único parámetro en ambos conjuntos de varillas. Tras romper la covariación el

mejor modelo fue una combinación de masa y momento estático, a pesar de que dicha explicación es compleja por no ser la masa una propiedad relacional respecto a las distintas posiciones de las que se puede agarrar la varilla. Withagen y Michaels (2005) se muestran de acuerdo con la explicación basada en diferentes variables y añaden que dependen de lo experto que sea el participante (cuanto más experimentado, sintonizará con variables más útiles).

Van de Langerberg y cols. (2006) explican que en condiciones de balanceo, la variable informacional utilizada va a depender de la ratio entre I_{xx} y M , siendo el elemento más saliente el utilizado en la estimación. A este índice lo llaman «*saliencia (saliencie)*», refiriéndose a la claridad de los invariantes en el flujo estimular. Continuando esta línea de investigación, diversos autores han mostrado que tanto las condiciones de la tarea, como la utilización de feedback, permite modular las variables utilizadas por los participantes (Cabe, 2010; Jacobs, Silva y Calvo, 2009; Withagen y van Wermeskerken, 2009).

Más aún, recientemente se ha demostrado que las variaciones en la detección de los diferentes candidatos informacionales vienen acompañadas de cambios en los movimientos de exploración realizados con el objeto. Así, Armazarski y cols. (2010) han mostrado que los cambios provocados en la dimensión del objeto a percibir (longitud vs anchura) viene acompañada de cambios en los ejes sobre los que se sopesa el objeto (anteroposterior vs lateral, respectivamente). Y en una línea de investigación activa en la actualidad, Michaels y Isenhower (2011a, 2011b) han mostrado cómo, de la misma forma que es posible variar por medio de feedback las variables informacionales utilizadas por los participantes en el tacto dinámico, en las condiciones de estimación longitudinal el uso de estas variables está relacionada con la exploración en el eje antero-posterior a una determinada aceleración angular. Así, estos autores sugieren que el uso de información de la torsión longitudinal, y claves gravitacionales, no debe ser interpretado como una combinación de claves informacionales a nivel cognitivo, sino una consecuencia directa de la forma de explorar.

El estudio empírico que presentamos en este trabajo tiene como objetivo continuar el análisis del papel de los movimientos de exploración en el ajuste de nuestra percepción de la longitud por medio del tacto dinámico, y utilizar restricciones de estos movimientos para inferir las claves informacionales óptimas para realizar la estimación de longitud en el tacto dinámico.

Como anteriormente se destacaba, la covariación en objetos con un reparto homogéneo de la masa entre momento estático y primer momento de inercia, impide en principio diferenciar lo atribuible a cada uno de ellos, ya que ambos dependen de la masa y de su distribución. Sin embargo, el momento de inercia solo es accesible con movimiento, como señalaban Kingma y cols. (2002). Nuestra aproximación trata de establecer qué candidatos informacionales son mejores y permiten una percepción más ajustada eliminando o restringiendo el posible uso de otros, esto es, si diferentes condiciones de exploración permiten una percepción más ajustada de la longitud.

El objetivo de nuestro experimento es, por tanto, poner a prueba la hipótesis de que la velocidad y la amplitud del movimiento, como patrones específicos de exploración, permiten extraer diferentes variables informacionales que se utilizan en la estimación de la longitud de las varillas que no están accesibles a la vista. A su vez, la extracción de dichas variables informacionales se relacionaría con un diferente grado de ajuste a la longitud real. Así, si el momento estático fuera el candidato utilizado no habría

ningún índice que indicara cambios del ajuste de las estimaciones dependiendo de las diferentes condiciones de exploración. Sin embargo, encontrar que existen diferencias en las estimaciones que se relacionan con el movimiento indicaría, necesariamente, que el momento de inercia es mejor candidato.

Además, los resultados de Kingma y cols. (2002, 2004) señalan que en las condiciones de sujeción estática la estimación se realiza por medio de una combinación del momento estático y la masa, en lugar de estar guiada por el momento de inercia. Dado que en esta condición, y en aquellas con una velocidad de balanceo baja, el acceso a este último candidato queda impedido por la restricción de la exploración, esperamos que los ajustes sean peores que en las condiciones de mayor velocidad de balanceo y la condición libre.

Una forma alternativa de estudiar la presencia de estas combinaciones de candidatos en las exploraciones restringidas está en el análisis de la confianza de los participantes en sus estimaciones. Así, Runeson y cols. (Andersson y Runeson, 2008; Runeson, Juslin y Olsson, 2000; véase también Jackson, Warren y Abernethy, 2006) proponen que existe una relación entre la confianza expresada en las estimaciones y el ajuste de las mismas. Por ello, en la tarea que presentamos a continuación decidimos solicitar a los participantes una valoración de su confianza en cada una de las estimaciones realizadas.

Método

Participantes

En el experimento participaron 15 estudiantes de grado o posgrado en Psicología (7 mujeres y 8 hombres). De ellos, 13 fueron diestros y 2 zurdos, con un rango de edad de 19-41 años. Los participantes desconocían el procedimiento, los aparatos utilizados y, por supuesto, los objetivos del experimento.

Materiales

Se utilizaron siete varillas de madera de radio de 6,5 mm y densidad media 481,5 Kg/m³, que variaban sistemáticamente en longitud (tabla 1).

Una mesa de metal de 50 cm de largo, 50 cm de ancho y 40 cm de altura sostenía un marco en el cual unas barras graduadas móviles se fijaban para producir la restricción del movimiento. Una cortina opaca con una apertura para pasar el brazo impedía que el participante pudiera ver la varilla y su mano. El movimiento en horizontal de balanceo estaba restringido con una apertura de 2 cm entre las barras verticales que se mantuvo constante en todo el experimento. A la izquierda del participante se colocó un listón de madera sobre el que se desplazaba una barra de un metro de longitud, en cuyo extremo una pletina marcaba la medida con una resolución de 0,5 mm sobre una cinta métrica colocada en el lado del listón no visible para el participante (figura 1).

Nº de varilla	1	2	3	4	5	6	7
Longitud (m)	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
Masa (Kg)	0,0195	0,022	0,0253	0,0293	0,0312	0,0355	0,0386

Diseño

Se llevó a cabo un diseño intrasujeto de estimación de magnitudes por cruce de modalidades en el que cada participante realizó seis condiciones (figura 2). Las cuatro primeras condiciones llamadas «de restricción» son el resultado de la combinación de dos frecuencias diferentes de balanceo (0,5 y 0,25 Hz) marcadas con un metrónomo, con dos amplitudes angulares diferentes (0,3 y 0,6 rad) acotadas por un sistema de varillas móviles.

Las dos condiciones intermedias (B y C) suponían el mismo cociente como se observa en la tabla 2, es decir, la misma velocidad angular media. Finalmente, realizaron una condición de sujeción estática, donde la varilla no se podía mover ya que estaba en un espacio muy limitado (2 cm), y otra condición de balanceo libre en el que el participante podía mover la varilla como deseara.

La variable dependiente era la longitud percibida, que los participantes indicaron en una barra de referencia que movían con la mano izquierda cuando se les había retirado ya la varilla. No tuvieron ninguna información sobre su ejecución. La barra que debían igualar a la longitud percibida solo podía ser arrastrada, no se podía levantar, por lo que la tarea de igualación era visual. Se realizaron 3 repeticiones de cada condición experimental. Finalmente, cada participante realizó 126 ensayos resultantes de multiplicar las 7 varillas con distintas longitudes, por las 6 condiciones de movimiento y las 3 repeticiones de cada una de las anteriores combinaciones.

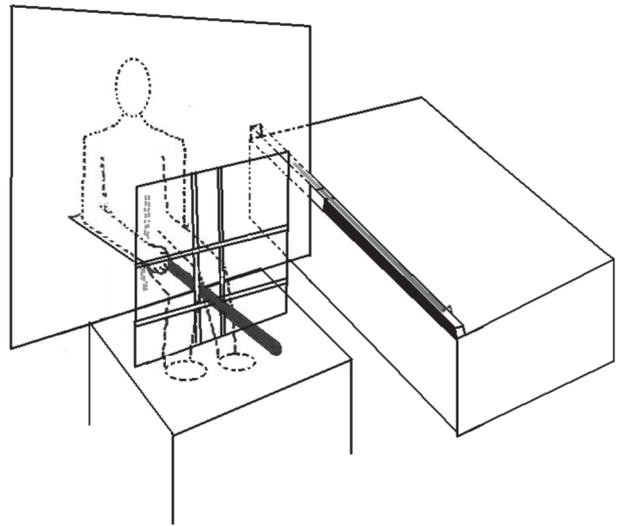


Figura 1. Vista desde la posición del experimentador de la disposición de los materiales

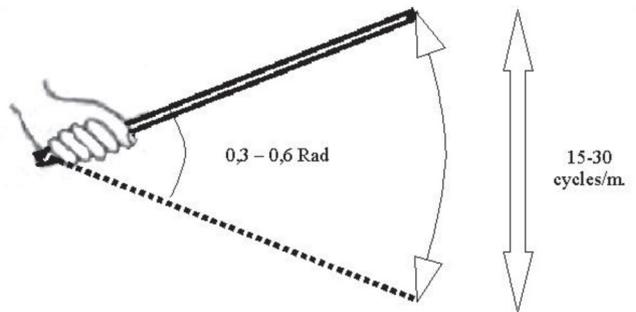


Figura 2. Esquema de las combinaciones de las condiciones de restricción

Tabla 2
Resumen de las condiciones del experimento

Condición	Frecuencia	Espacio	Velocidad angular media
A	0'25 Hz (15 ciclos/min)	0'3 rad	$\omega(A)= 0'075$ rad/s
B	0'25 Hz (15 ciclos/min)	0'6 rad	$\omega(B)= 0'15$ rad/s
C	0'5 Hz (30 ciclos/min)	0'3 rad	$\omega(C)= 0'15$ rad/s
D	0'5 Hz (30 ciclos/min)	0'6 rad	$\omega(D)= 0'3$ rad/s
E		Sujeción estática	
F		Movimiento libre	

Procedimiento

Los participantes realizaron el experimento individualmente. La entrada al laboratorio se produjo con los ojos tapados por un antifaz, una vez sentados tras la cortina negra se les retiró. Se pidió a los participantes que situaran el brazo derecho en un soporte paralelo al plano horizontal y se colocaron unas bandas elásticas alrededor que permitían solo el movimiento de la muñeca. El apófisis estiloides contrario al dedo pulgar se colocó justo al final del soporte, de forma que el resto de la mano quedara por detrás de la cortina negra opaca que impedía la visión.

Al comenzar cada condición se utilizó una varilla de ensayo de diferente densidad a las utilizadas en la serie experimental para explicar cómo habría de sujetarse, dónde estaba el límite de la amplitud del movimiento y adecuar éste al ritmo marcado en la condición. Cuando el experimentador comprobaba que el participante lo hacía correctamente, se retiraba la varilla de ensayo y comenzaba la condición con las siete varillas del experimento propiamente dicho. Se pidió a los participantes que agarraran firmemente cada una de las varillas con la mano derecha, se comprobó que el final de ésta coincidiera con la cortina, y de este modo se aseguró que las varillas siempre fuesen empuñadas de la misma manera. El experimentador sujetaba y recogía las varillas desde un punto marcado en ellas a 24 cm del inicio, de forma que, el lugar donde sujetaba la varilla el experimentador, quedaba siempre a la misma distancia de la mano del participante.

En cada uno de los 21 ensayos de las condiciones de restricción (A, B, C y D) el experimentador movía una vez la varilla hacia el límite superior y otra hacia el inferior para adecuar el movimiento del participante a la frecuencia de la condición y señalar los límites. Después los participantes completaron 3 ciclos (seis movimientos) antes de indicar la longitud percibida. En las condiciones de movimiento libre y sujeción estática no existía límite de tiempo, el participante decidía cuándo estaba listo para indicar la longitud de la varilla. Para asegurarnos de que realmente los participantes mantenían la varilla estática, la restricción de movimiento era máxima, dejando solamente 6 milímetros de espacio a cada lado de la varilla para que no se apoyara en las barras de restricción, lo que suponía un espacio cuadrado de 2×2 cm.

En las condiciones de restricción del movimiento, los sonidos regulares se presentaron con el metrónomo digital MiniMetro, versión 1.0.0.1. El ruido ambiental de fondo en el laboratorio fue de 53dB, mientras que la medición con un sonómetro en el momento en que se daba el «beat» del metrónomo indicaba una intensidad de 70 dB. Ningún participante manifestó problemas de audición ni se requirió modificar la intensidad de los sonidos. Cada vez que

terminaban una condición, el experimentador pedía al participante que éste le indicara su nivel de confianza en las estimaciones que había realizado en la condición inmediatamente anterior en una escala tipo Likert con 7 puntuaciones, siendo 1 ninguna confianza y 7 la máxima confianza en la estimación.

Análisis de datos

Para llevar a cabo el análisis de los datos se utilizó el paquete estadístico SPSS versión 15.0. El grado de ajuste entre la longitud real de la varilla y la estimada se obtuvo mediante una recta de regresión y su R^2 correspondiente para cada condición. Para estudiar el efecto del patrón de exploración se realizaron diversos ANOVAs sobre el valor de ajuste R^2 , que se tipificó en dichos casos según la Z de Fisher. Los efectos de cada condición y de cada nivel de un factor se analizaron mediante comparaciones por pares y de efectos principales, según el tipo de ANOVA. Se consideró que un estadístico era significativo cuando su probabilidad asociada era menor que 0,05.

Resultados

En primer lugar mostramos el ajuste entre la longitud real de las varillas y la estimada por los participantes. Los diagramas de dispersión de la figura 3 muestran la recta de ajuste entre la longitud real y la percibida en cada condición de exploración.

Se realizó un ANOVA de medidas repetidas de un factor (tipo de exploración) con seis niveles (condiciones A, B, C, D, E y F), siendo la variable dependiente el valor de ajuste R^2 de las estimaciones (figura 4). El contraste univariado reveló efectos significativos del factor condición ($F_{(5,70)} = 8,059$, $p < 0,001$).

Las comparaciones por pares mostraron que la condición A producía ajustes significativamente peores que las condiciones B ($p = 0,042$) y F ($p = 0,001$), lo mismo que se refleja en los coeficientes beta tipificados de las rectas de regresión de la tabla 3. Las condiciones C y D no eran significativamente diferentes de ninguna otra condición y la condición E y la F sí eran significativamente diferentes ($p = 0,009$).

A continuación, se realizó un ANOVA de dos factores de medidas repetidas: amplitud angular (0,3 y 0,6 rad) y frecuencia (0,25 y 0,5 Hz), sobre el valor de ajuste R^2 de las estimaciones, utilizando únicamente las condiciones con restricción. Este análisis mostró un efecto significativo de la amplitud angular ($F_{(1,14)} = 5,383$, $p < 0,05$) y de la interacción entre ambos ($F_{(1,14)} = 4,773$, $p < 0,05$). Así, la amplitud angular menor produjo ajustes significativamente peores que la amplitud angular mayor, y además, este efecto fue más pronunciado en la frecuencia más baja ($p = 0,036$). Se realizaron comparaciones planeadas para el factor velocidad angular (con cuatro niveles, referidos a cada una de las condiciones de restricción) que mostraron que se daba un ajuste significativamente peor en la condición A ($\omega = 0,075$ rad/s), que en las condiciones B ($\omega = 0,15$ rad/s), C ($\omega = 0,15$ rad/s) y D ($\omega = 0,3$ rad/s) tomadas juntas ($F_{(1,14)} = 10,693$, $p < 0,01$). Cuando se compararon las dos velocidades angulares intermedias contra la menor (condiciones B y C contra A) se demostró que similarmente a lo ocurrido en el análisis anterior, el ajuste era significativamente mejor en el caso de las condiciones B y C tomadas juntas frente a la condición A ($F_{(1,14)} = 9,866$, $p < 0,01$). Por el contrario, no se encontraron diferencias significativas entre las dos velocidades angulares medias y la mayor (condiciones B y C contra D).

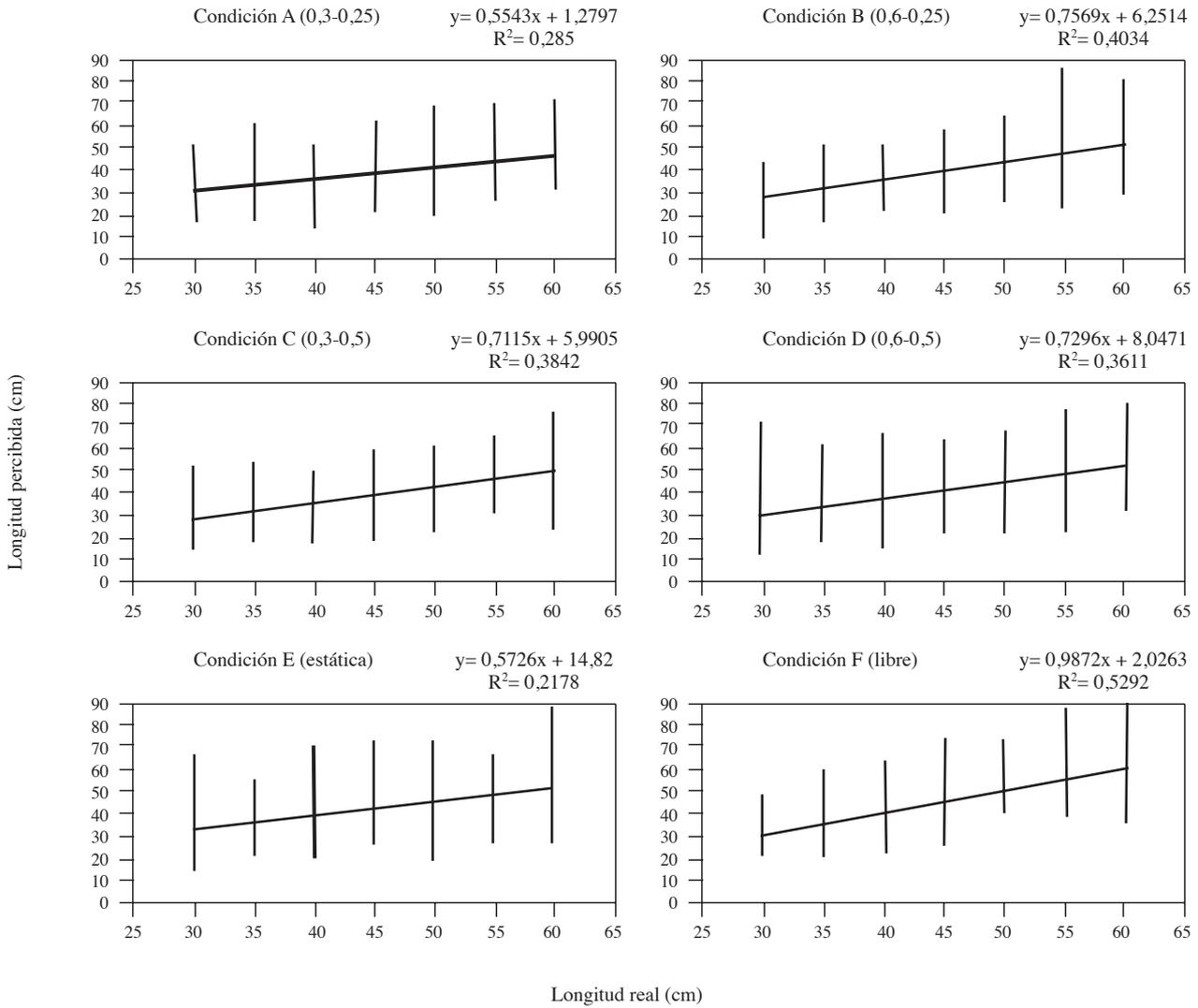


Figura 3. Diagrama de dispersión y regresión lineal en las diferentes condiciones de exploración

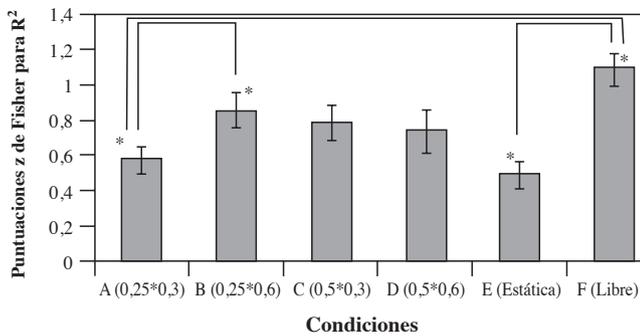


Figura 4. Comparaciones del grado de ajuste por condición

Condición	Beta tipificado
A	0,534
B	0,635
C	0,620
D	0,601
E	0,467
F	0,727

Discusión y conclusiones

Respecto a la escala tipo Likert de confianza, el estadístico de Greenhouse-Geisser es $F_{(2^{*}805,39^{*}274)} = 5,884$; $p < 0,01$, lo que demuestra que existen diferencias de confianza entre las condiciones (figura 5). Las comparaciones por pares señalan que la confianza es significativamente mayor en la condición F que en la condición A ($p = 0,020$), la condición C ($p < 0,001$) y la condición E ($p = 0,014$).

Los últimos estudios sobre tacto dinámico y longitud percibida han seguido dos preguntas de investigación diferenciadas. Una primera línea ha centrado su interés en las variables informativas que se relacionan con la propiedad del objeto a percibir pero no han tenido tan en cuenta el patrón de exploración que subyace a la

extracción de dichos candidatos (Kingma y cols., 2002; Kingma y cols., 2004; van de Langenberg y cols., 2006; Cabe, 2010). Mientras que una segunda línea, siguiendo las recomendaciones originales de Burton y Turvey (1990) y otros trabajos (Turvey y cols., 1992; Shimizu y Norimatsu, 2005) que contemplan la orientación como un comportamiento exploratorio a estudiar, han tratado de poner en relación el análisis de los candidatos informacionales utilizados y las formas de exploración llevadas a cabo (Armazarski y cols., 2010; Michaels e Isenhower, 2011a, 2011b).

En nuestro experimento el diferente grado de ajuste y por tanto el mejor rendimiento en las condiciones de velocidad angular media y alta, y sobre todo en el movimiento libre, demuestra que la importancia del patrón de exploración recae sobre el movimiento, que es el que permite el uso de unos candidatos frente a otros gracias a la existencia de inercia que no es accesible en condiciones estáticas. El hecho de que el primer momento de inercia (I_{xx}) sea inseparable de una ejecución en la que exista aceleración angular nos indica que el mejor rendimiento se debe a la participación del momento de inercia en las condiciones de velocidad angular media, alta o de exploración libre, frente a las condiciones de velocidad angular baja o sujeción estática, que se relacionarían con el momento estático, combinado o no con la masa como sugiere Kingma y cols. (2002) con su modelo de dos parámetros.

La constatación de que el espacio reducido solo resultó significativo en su interacción con el cambio de frecuencia evidencia

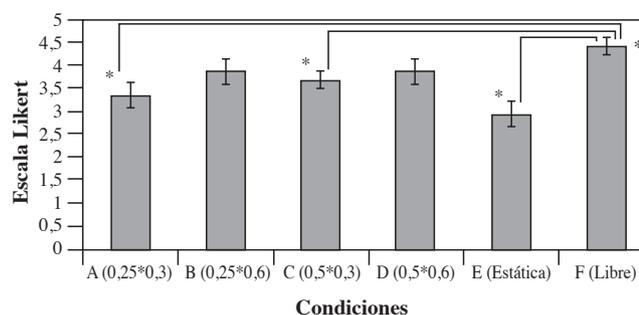


Figura 5. Comparaciones entre el grado de confianza en las estimaciones por condición

que es la velocidad angular la que determina el candidato informacional que se utiliza y no otros aspectos generales tomados por separado. Dicho resultado es acorde con lo mostrado por Michaels e Isenhower (2011b), que muestran cómo la aceleración angular es el parámetro de movimiento relevante en el acceso a la información. Si bien nuestro estudio no permite estimar cambios en la velocidad, creemos que las diferencias en velocidad, medida como frecuencias de los balanceos, puede ser interpretado en el mismo sentido que las aceleraciones en los trabajos de Michaels e Isenhower. Las comparaciones planeadas muestran que una velocidad angular muy baja se diferencia como patrón de exploración de las demás y se relaciona más con el ajuste que se obtiene desde la sujeción estática de la varilla.

Los datos obtenidos del análisis de las respuestas en la escala Likert señalan un patrón parecido al ajuste estadístico realizado con las medidas de longitud observadas, siendo el aumento en la confianza sobre la condición de movimiento libre el efecto más llamativo. Parece que los participantes sienten que su ajuste mejora cuando controlan libremente el movimiento y es sensiblemente peor cuando la velocidad angular es muy baja o la sujeción es estática, aspecto este último que coincide con el grado de ajuste a la longitud real.

Conviene señalar que la afirmación sobre el necesario uso de invariantes no estáticos tiene que ver con el ajuste diferencial en las distintas condiciones. En la condición de velocidad angular baja, el rendimiento es similar a la exploración estática, así que, de acuerdo con Kingma y cols. (2002), no podemos relacionarlo con el momento de inercia. Desde este punto de vista, el concepto de relevancia en el flujo estimular (*salience*) es una buena forma de explicitar que la adaptación o la sintonización que otros autores han mostrado que se produce entre invariantes en tareas de tacto dinámico tiene como objetivo final dar con la variable que permita un mejor ajuste en las condiciones preestablecidas. El movimiento, pues, no cambia las propiedades, solo permite un mejor ajuste, un acoplamiento más satisfactorio.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FFI2009-13416-C02-02 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España.

Referencias

- Andersson, I.E.K., y Runeson, S. (2008). Realism of confidence, modes of apprehension, and variable-use in visual discrimination of relative mass. *Ecological Psychology*, 20, 1-31.
- Armazarski, R., Isenhower, R.W., Kay, B.A., Turvey, M.T., y Michaels, C.F. (2010). Effects of intention and learning on attention to information in dynamic touch. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(3), 721-735.
- Burton, G., y Turvey, M.T. (1990). Perceiving the lengths of rods that are held but not wielded. *Ecological Psychology*, 2, 295-324.
- Cabe, P.A. (2010). Sufficiency of longitudinal moment of inertia for haptic cylinder length judgements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(2), 373-394.
- Carello, C., Fitzpatrick, P., Domaniewicz, I., Chan, T.C., y Turvey M.T. (1992). Effortful touch with minimal movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(1), 290-302.
- Giancoli, D.C. (2008). *Física para Ciencias e Ingenierías*. Madrid: Prentice Hall.
- Gibson, J.J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- Hoisington, L.B. (1920). On the non-visual perception of the length of lifted rods. *American Journal of Psychology*, 31, 114-146.
- Jackson, R.C., Warren, S., y Abernethy, B. (2006). Anticipation skill and susceptibility to deceptive movement. *Acta Psychologica*, 123, 355-371.
- Jacobs, D.M., y Michaels, C.F. (2007). Direct learning. *Ecological Psychology*, 19, 321-349.
- Jacobs, D.M., Silva, P.L., y Calvo, J. (2009). An empirical illustration and formalization of the theory of direct learning: The muscle-based perception of kinetic properties. *Ecological Psychology*, 21, 245-289.
- Jones, L.A., y Lederman, S.J. (2006). *Human hand function*. New York: Oxford University Press.
- Kingma, I., Beek, P.J., y van Dieën, J.H. (2002). The inertia tensor versus static moment and mass in perceiving length and heaviness of hand-wielded rods. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(1), 180-191.

- Kingma, I., van de Langenberg, R., y Beek, P.J. (2004). Which mechanical invariants are associated with the perception of length and heaviness of a nonvisible handheld rod? Testing the inertia tensor hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30, 346-354.
- Runeson, S., Juslin, P., y Olsson, H. (2000). Visual perception of dynamic properties: Cue heuristics versus direct-perceptual competence. *Psychological Review*, 107(3), 525-555.
- Shimizu, T., y Norimatsu, H. (2005). Detection of invariants by haptic touch across age groups: Rod length perception. *Perceptual Motor Skills*, 100(2), 543-553.
- Solomon, H.Y., y Turvey, M.T. (1988). Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(3), 404-427.
- Turvey, M.T., Burton, G., Pagano, C.C., Solomon, H.Y., y Runeson, S. (1992). Role of the inertia tensor in perceiving object orientation by dynamic touch. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3), 714-727.
- Turvey, M.T. (1996). Dynamic touch. *American Psychologist*, 51(11), 1134-1152.
- Van de Langenberg, R., Kingma, I., y Beek, P.J. (2006). Mechanical invariants are implicated in dynamic touch as a function of their salience in the stimulus flow. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 32(5), 1093-1106.
- Withagen, R., y Michaels, C.F. (2005). The role of feedback information for calibration and attunement in perceiving length by dynamic touch. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(6), 1379-1390.
- Withagen, R., y van Wermeskerken, M. (2009). Individual differences in learning to perceive length by dynamic touch: Evidence for variation in perceptual learning capacities. *Attention, Perception & Psychophysics*, 71, 64-75.