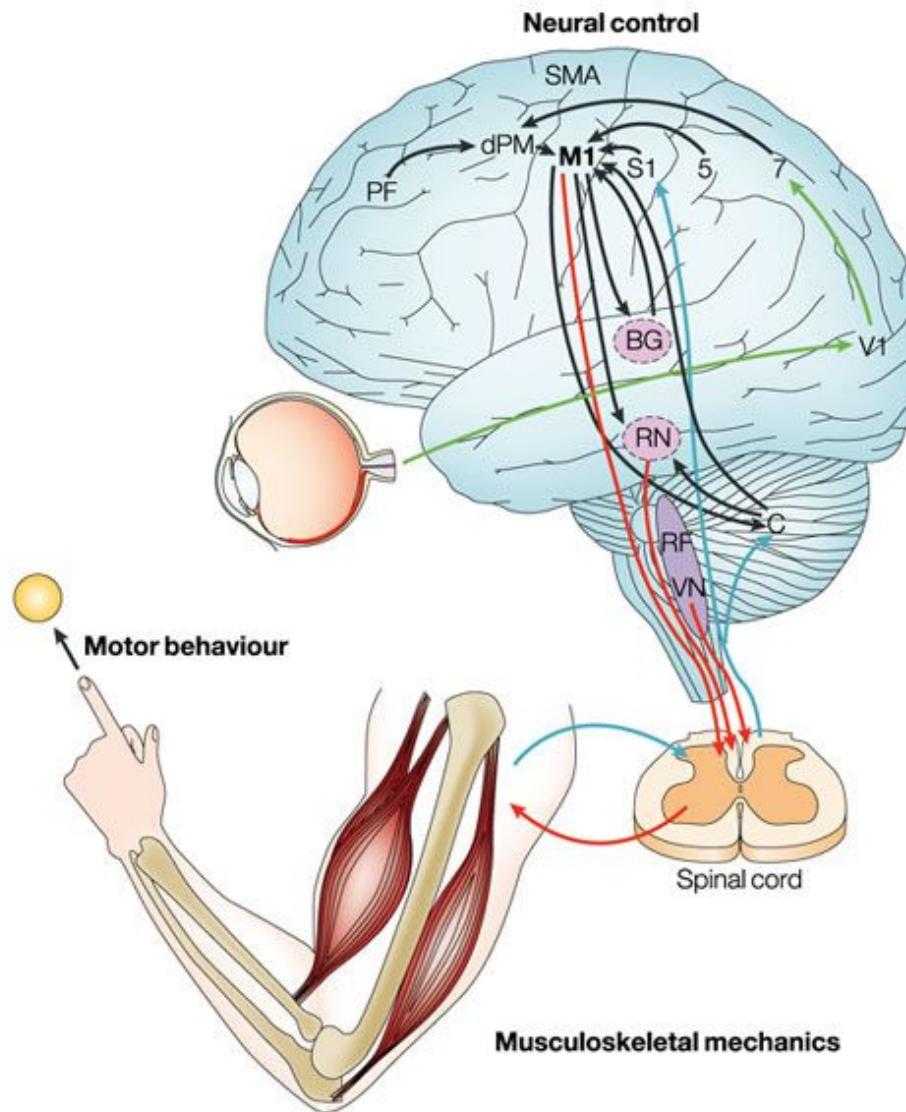


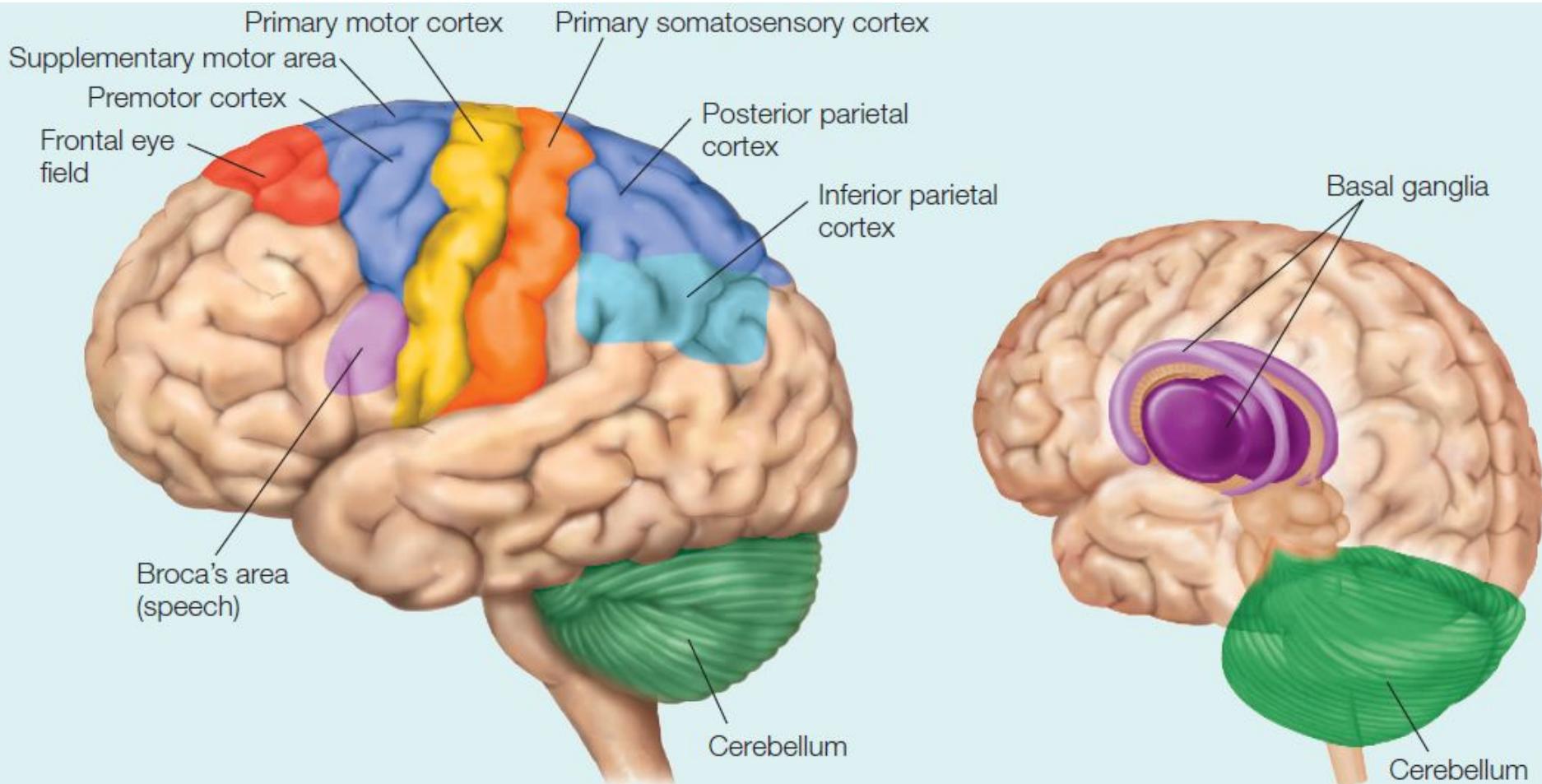
Sistemas motores y control motor

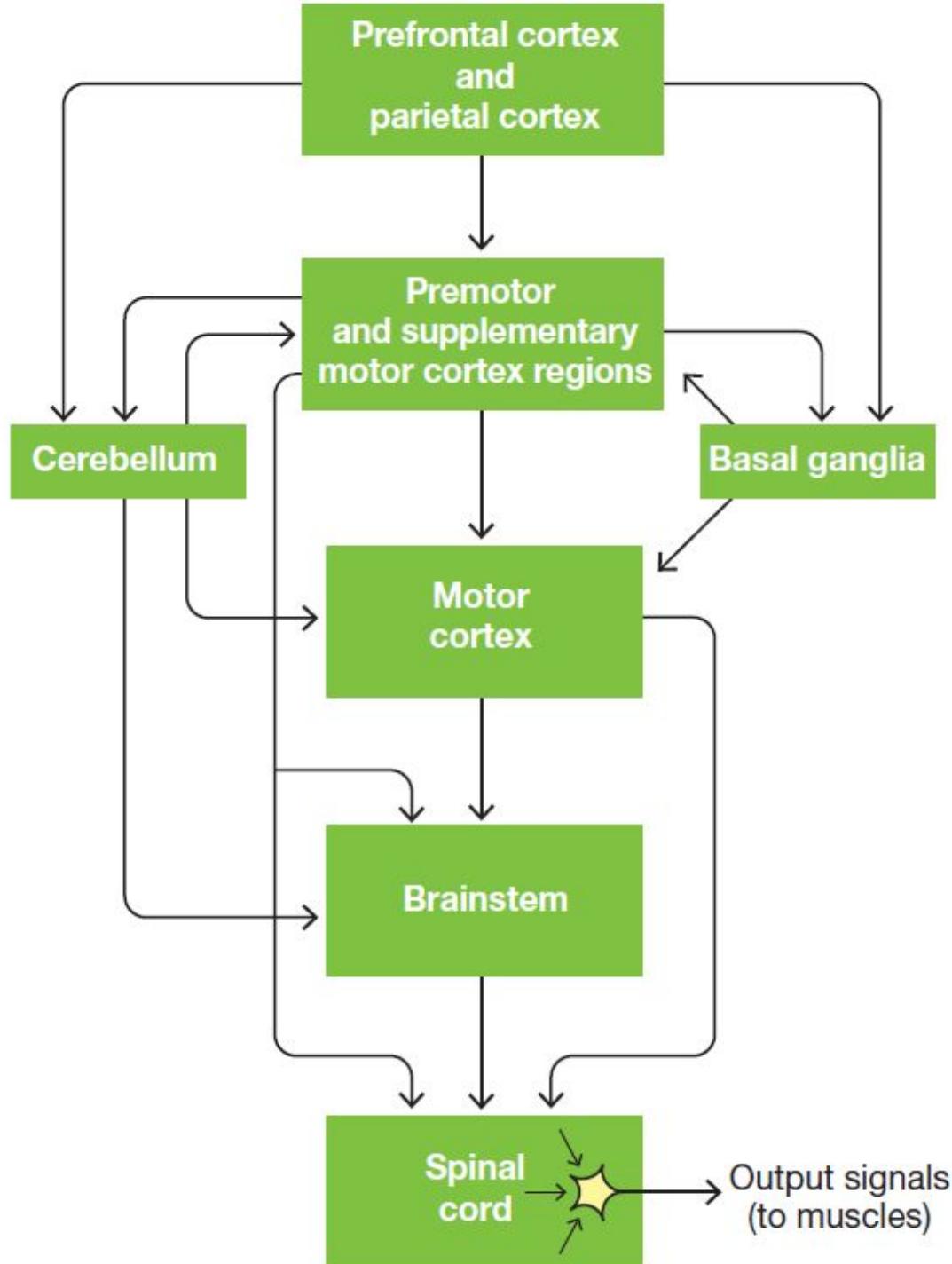
Leonel Gómez

Sistema motor



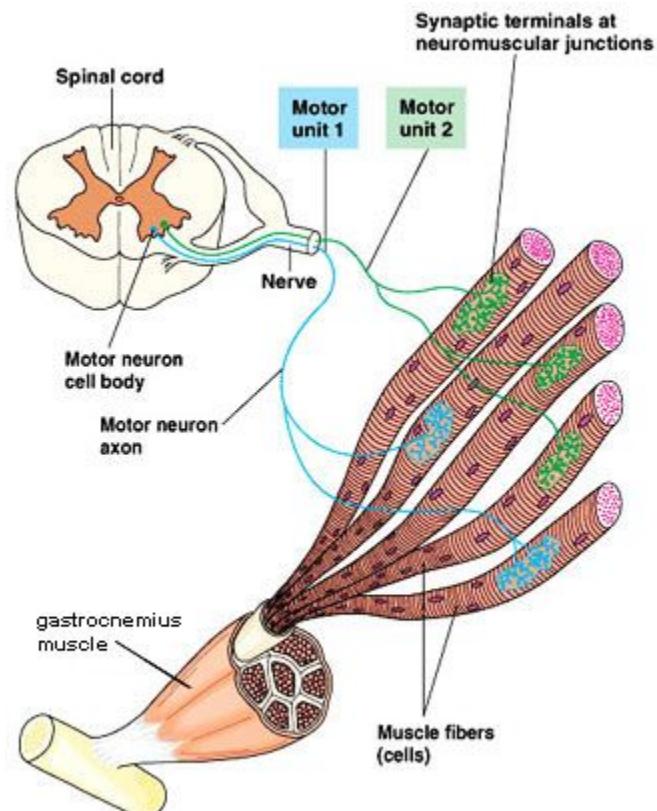
Bases anatómicas





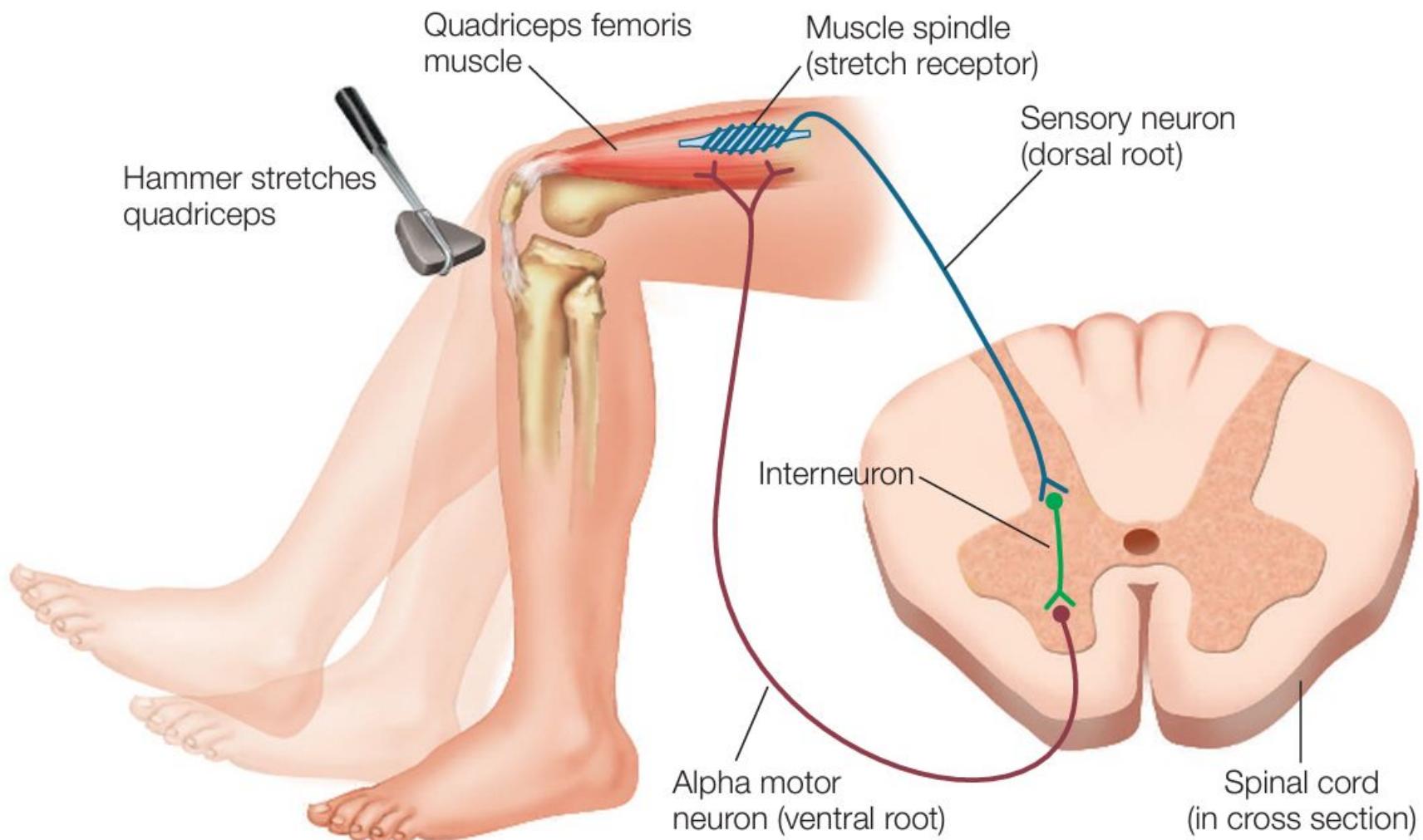
Unidad motora

- El bloque básico de la salida motora es la "unidad motora" - una neurona motora y las fibras musculares que inerva.



Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

El arco reflejo



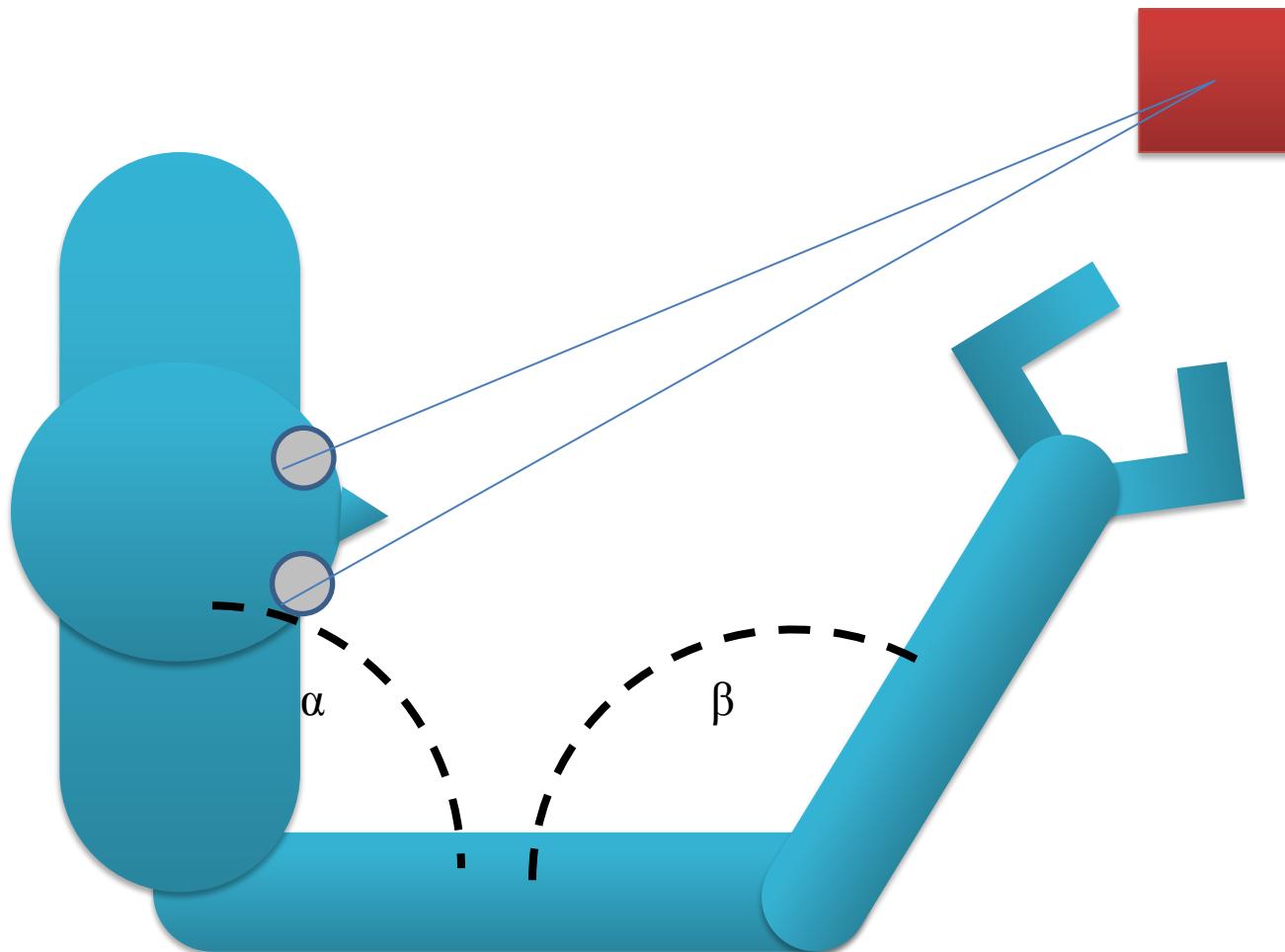
Control

- En general, el problema del control puede ser considerado como el proceso computacional de determinar la entrada a algún sistema que deseamos controlar para que logre la salida deseada.
- En el control motor humano, el problema es seleccionar la entrada, es decir: el comando motor, para conseguir una salida requerida, es decir, la realimentación sensorial deseada.

Coordinación del movimiento

Con el fin de coordinar el movimiento, un conjunto apropiado de músculos deben ser activados en una **secuencia temporal adecuada** y una cantidad apropiada de **inhibición** tiene que ser aplicada a cada uno de los músculos que se oponen al acto motor requerido.

Control motor

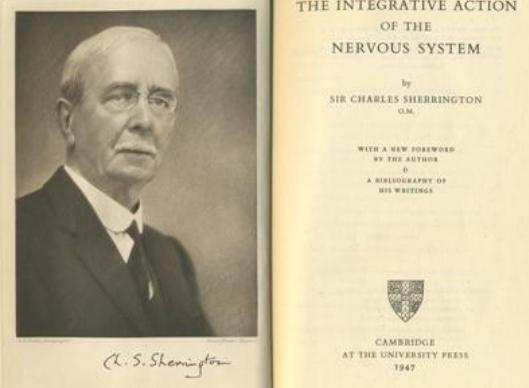


El estudio computacional del control motor se preocupa fundamentalmente de la relación entre las señales sensoriales y los comandos motores.

- La transformación de los comandos motores a sus consecuencias sensoriales está regida por la física del entorno, el sistema musculoesquelético y los receptores sensoriales.
- La transformación de las señales sensoriales a los comandos motores está determinada por procesos dentro del sistema nervioso central (SNC).

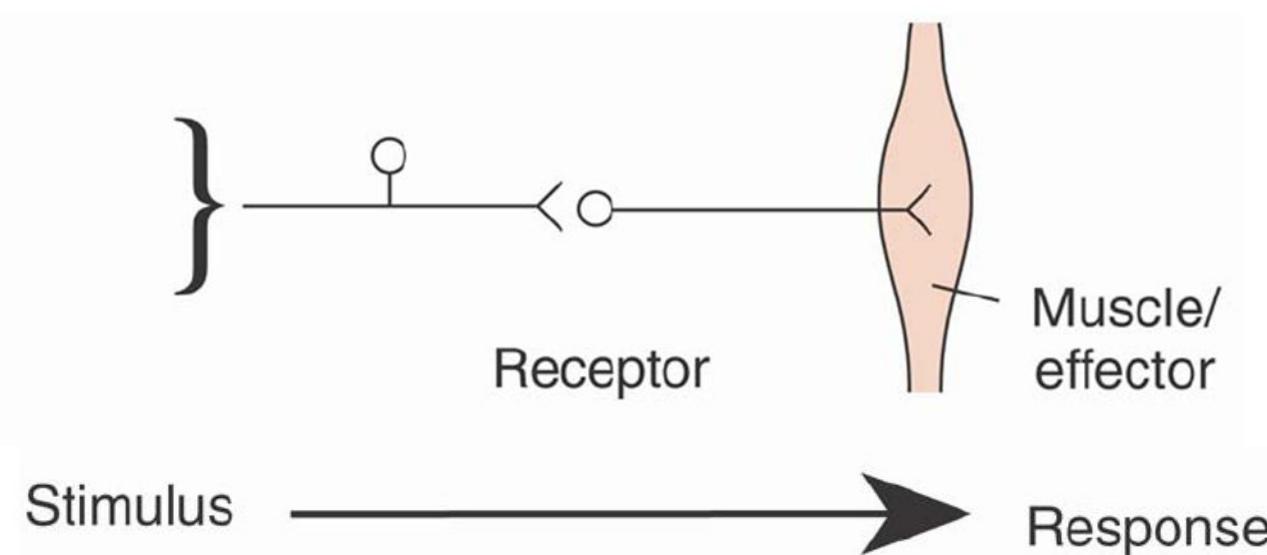
- Si consideramos el ejemplo de levantar una vaso a los labios, la salida deseada en un momento específico podría ser una aceleración particular de la mano según se juzga por la retroalimentación sensorial.
- Sin embargo, el comando motor necesario para lograr esta aceleración dependerá de muchas variables, tanto internas como externas al cuerpo:
 - El comando motor depende del estado del brazo, es decir, de sus ángulos articulares y velocidades angulares.
 - Las ecuaciones dinámicas que gobiernan el sistema también dependen de algunos parámetros relativamente invariantes como la masa, momento de inercia y centro de masas de la parte superior del brazo y antebrazo.
 - Sin embargo, estos parámetros específicos del brazo no son suficientes para determinar el comando motor necesario para producir la aceleración de la mano deseada: es necesario también conocimiento de las interacciones con el mundo exterior.
 - Por ejemplo, la geometría y las propiedades inerciales del vaso alterarán la dinámica del brazo. Las condiciones ambientales más globales también contribuyen a la dinámica, como por ejemplo la orientación del cuerpo en relación con la gravedad y la aceleración angular del torso con relación al resto del cuerpo.





Teoría de los reflejos

Los reflejos son los componentes básicos de los comportamientos o movimientos motores complejos.



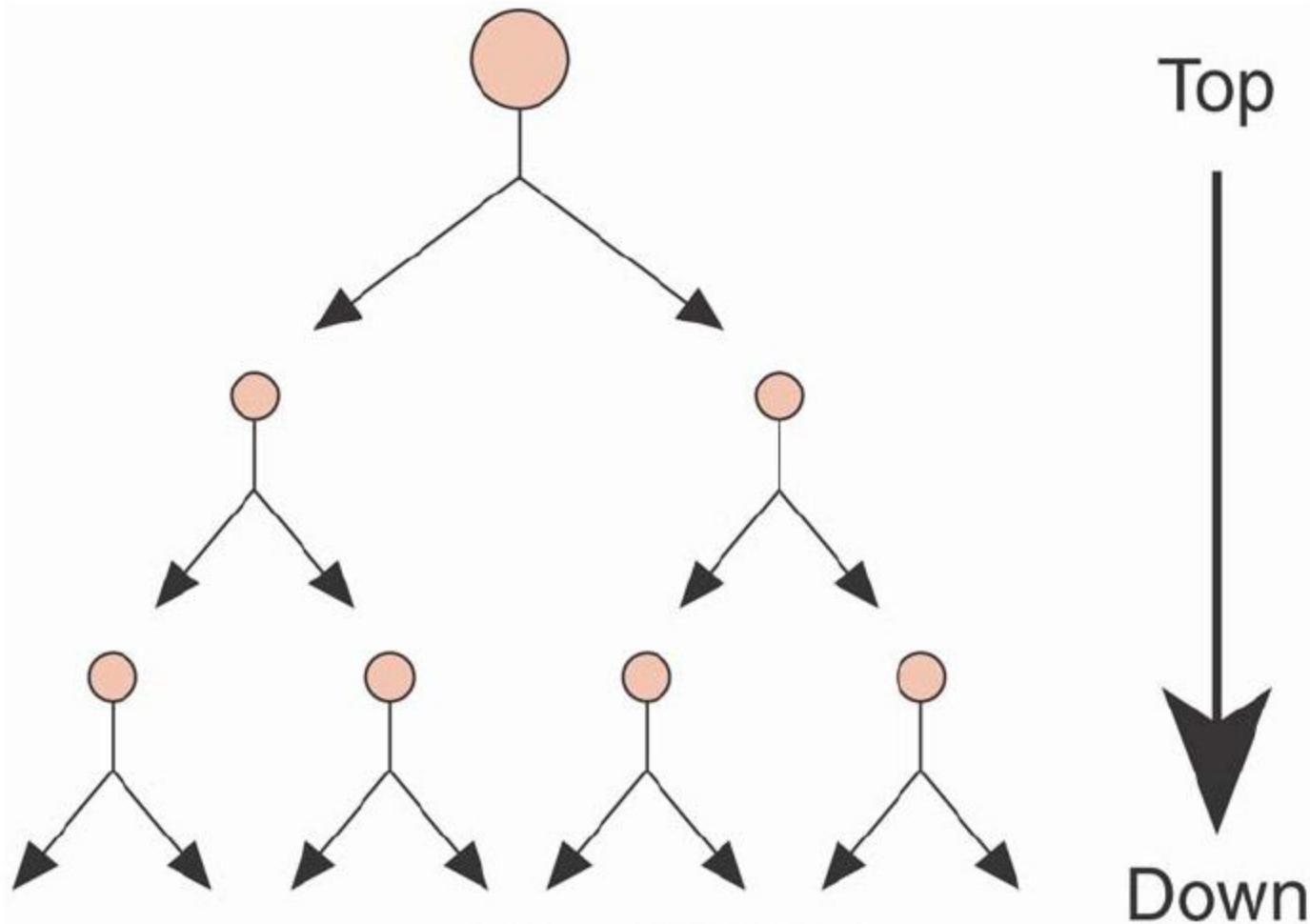
Teoría de los reflejos

- Sir Charles Sherrington en *La acción integradora del sistema nervioso* (1906)
- Encadenamiento de reflejos: los movimientos complejos son una secuencia de reflejos
- Se basa en la observación de que los monos no podían mover el brazo después de la resección, en uno de los lados, de los ganglios de la raíz dorsal. → Por lo tanto, las entradas sensoriales deben ser esenciales para iniciar los movimientos.

Limitaciones de la teoría refleja

- Incapaz de explicar
 - Movimientos espontáneos y voluntarios.
 - El movimiento puede ocurrir sin un estímulo sensorial. Edward Taub demostró que, en monos desprovistos de aferencias sensoriales, se podía inducir el movimiento voluntario de una extremidad si se limitaba el uso de la otra.
 - Movimientos secuenciales rápidos, p.e. mecanografía
 - Un solo estímulo puede desencadenar varias respuestas (los reflejos pueden modularse)
 - Se pueden realizar movimientos novedosos.

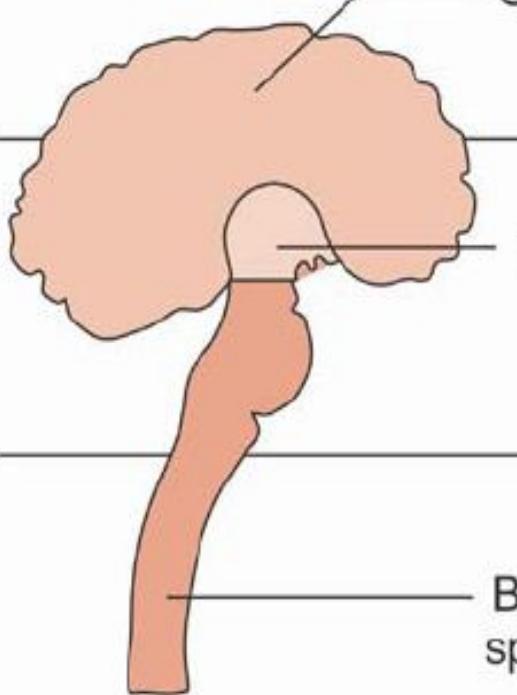
Teoría jerárquica



Teoría jerárquica

- Los centros superiores siempre tienen el control de los centros inferiores.
- Los centros superiores inhiben los reflejos controlados por los centros inferiores.
- Los reflejos controlados por los centros inferiores están presentes sólo cuando los centros superiores están dañados.
- Teoría neuromaduracional del desarrollo.
 - ¡El cerebro determina el comportamiento infantil!

Teoría jerárquica

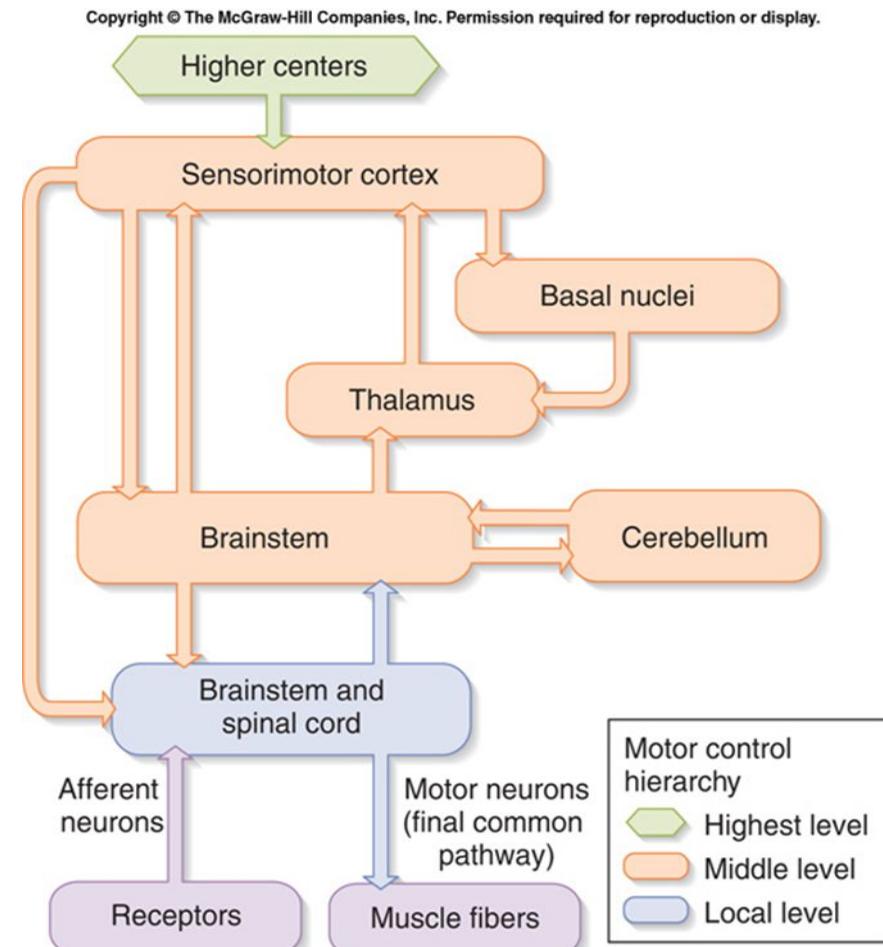
Neuroanatomical structures	Postural reflex development	Motor development
 <p>Cortex</p>	Equilibrium reactions	Bipedal function
Midbrain	Righting reactions	Quadrupedal function
Brainstem spinal cord	Primitive reflex	Apodal function

Teoría jerárquica

- Basado en la observación del desarrollo motor en niños y adultos.
 - La capacidad de un niño para sentarse, pararse y caminar está relacionada con la progresiva aparición y desaparición de reflejos.
 - Los reflejos del tronco encefálico (asociados con el control de la cabeza) emergen antes que los reflejos del mesencéfalo (asociados con el control del tronco)

Conceptos actuales relacionados con la teoría jerárquica

- Cada nivel del sistema motor puede actuar en otros niveles
- Los reflejos son uno de los muchos procesos de control motor.

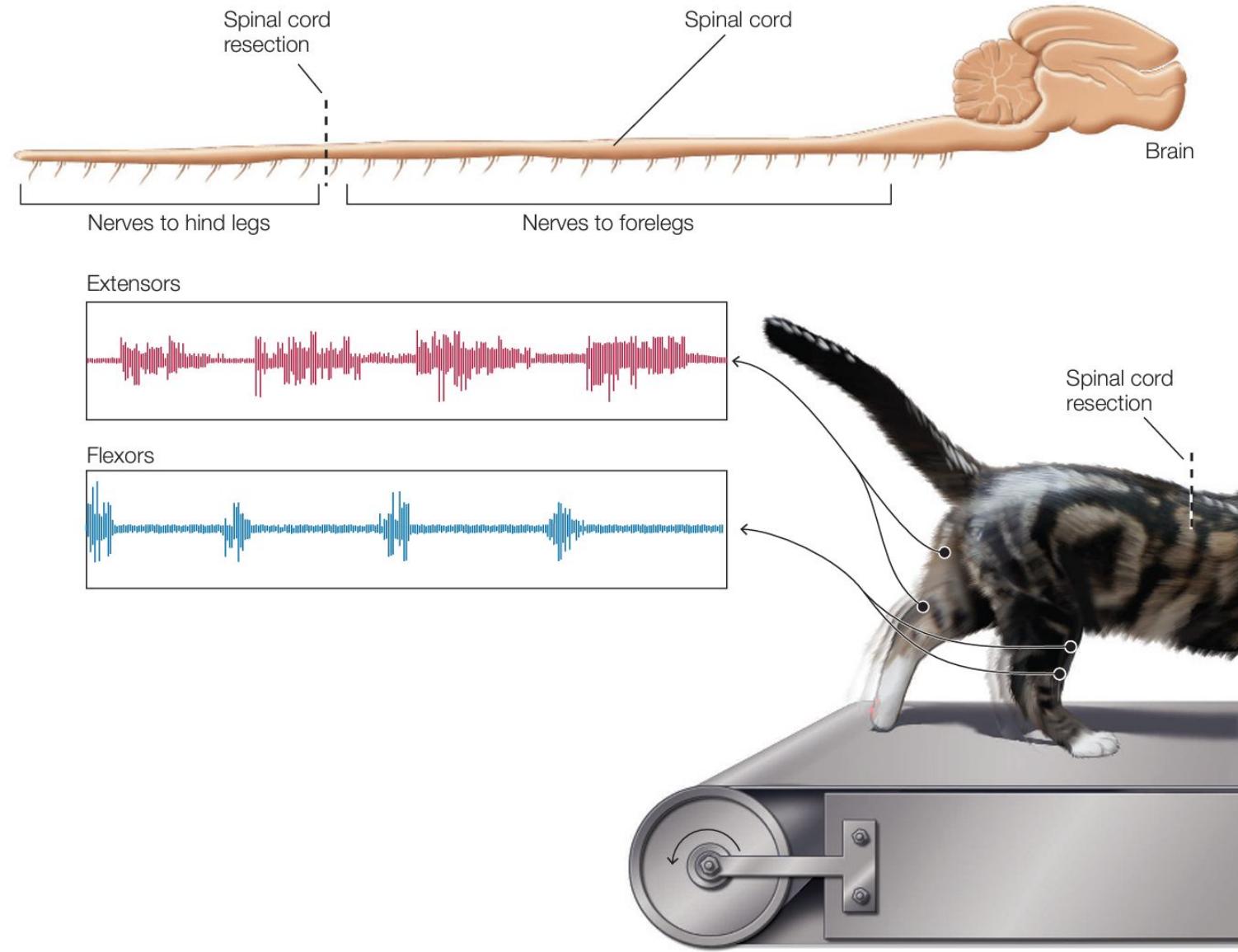


Teorías de programación motora

- Concepto de un patrón motor central o programa motor
 - Muchos estudios encontraron que el movimiento es posible incluso en ausencia de estímulos o entradas sensoriales.
 - Las entradas sensoriales no son necesarias para producir un movimiento, pero son importantes para adaptar y modular el movimiento.

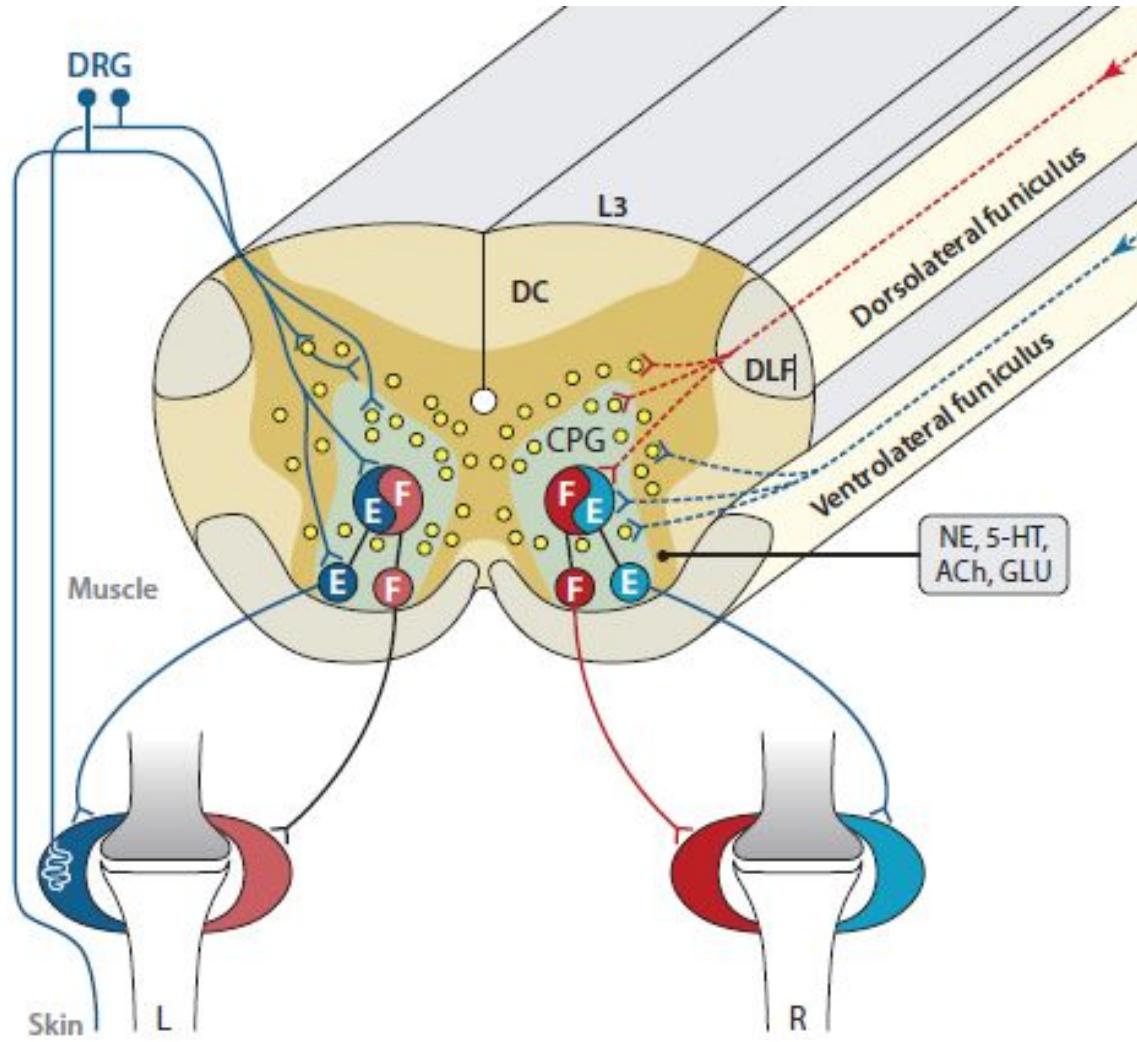
NGrillner's spinal cat studies, 1981: Neuronal networks in the spinal cord can be activated to produce a locomotor rhythm in the absence of sensory inputs and descending control from the cortex
Dimitrijevic et al. (1980's): Epidural spinal cord stimulation can elicit step-like EMG activity and locomotor synergies in paraplegic subjects with chronic spinal cord injury

Configuración general para estudios de locomoción en gatos con lesiones espinales



Central Pattern Generator (CPGs)

F flexor
motoneurons
E extensor
motoneurons
DC dorsal
columns
DRG dorsal
root ganglion



Rossignol, 2011

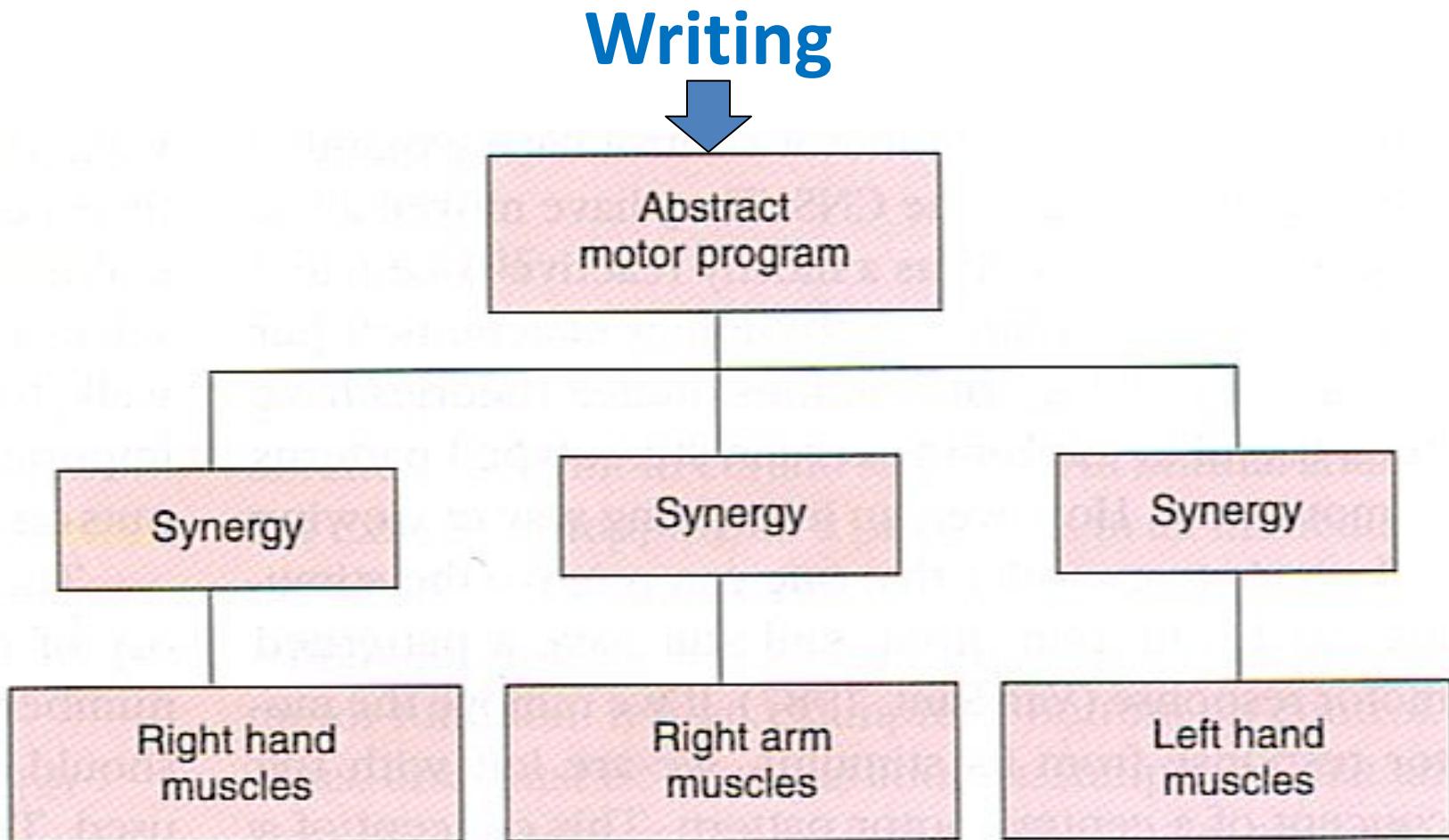
Evidencia de un programa motor: generador central de patrones (CPG)

- Los GPC son **redes espinales** capaces de generar movimientos bilaterales **rítmicos**, como nadar o caminar, **en ausencia** de señales **descendentes** y **entradas sensoriales**
- Los CPG son una red de interneuronas que activan alternativamente flexores y extensores en un lado y se coordinan con las CPG en el otro lado.

Motor Programming Theories

- Los programas motores son conexiones neuronales cableadas y estereotipadas, como los generadores de patrones centrales (CPG)
 - Reglas abstractas para generar movimientos en el nivel superior
- El programa motor puede activarse mediante estímulos sensoriales o mediante procesos centrales

Motor Programming Theories



En el contexto de las teorías de programas de control motor, la "sinergia" se refiere a la coordinación de diferentes grupos musculares y acciones motoras para lograr un movimiento o acción específica. Las sinergias son patrones predefinidos de actividad muscular que se organizan de manera cooperativa para realizar tareas motoras complejas. Estos patrones de actividad muscular pueden ser vistos como unidades funcionales que ayudan a simplificar la ejecución de movimientos.

Equivalencia motora

A Right hand

Able was I ere I saw Elba

B Right hand
(wrist fixed)

Able was I ere I saw Elba

C Left hand

Able was I ere I saw Elba

D Teeth

Able was I ere I saw Elba

E Foot

Able was I ere I saw Elba

Limitaciones de las teorías de programación motora

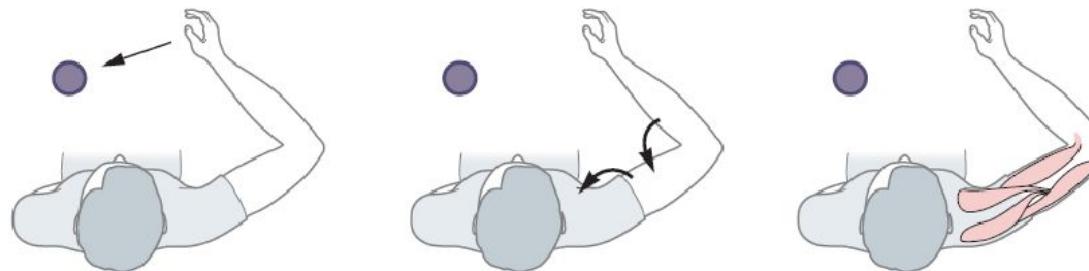
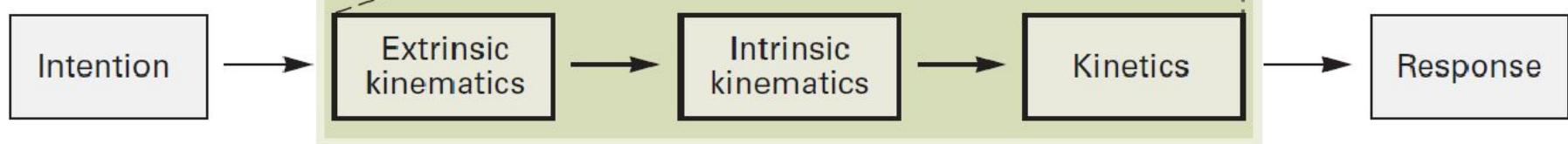
- No considera que el sistema nervioso debe lidiar tanto con variables musculoesqueléticas como ambientales para producir movimientos
 - p.ej. Comandos neuronales idénticos a los flexores del codo pueden producir diferentes movimientos dependiendo de la posición inicial del brazo y la fuerza de gravedad.

El control cortical de la conducta voluntaria parece estar organizado en una serie jerárquica de operaciones.

A



B



Cinemática y cinética

- **Cinemática Externa:** La cinemática externa se refiere al estudio del movimiento en términos de posición, velocidad y aceleración de un objeto o segmento del cuerpo *en relación con un sistema de referencia externo*. En el contexto del control motor, la cinemática externa se centra en cómo se mueve el cuerpo o partes del cuerpo en el espacio, sin considerar las fuerzas y los músculos involucrados. Es útil para describir la trayectoria y el ritmo del movimiento, así como para analizar el movimiento de manera cuantitativa.
- **Cinemática Interna:** La cinemática interna se enfoca en el estudio de las articulaciones, segmentos y músculos del cuerpo durante el movimiento. Se centra en las relaciones angulares y las posiciones relativas de las articulaciones y segmentos corporales. La cinemática interna es especialmente relevante para comprender cómo se generan y controlan los movimientos en el nivel de las articulaciones y los músculos, sin considerar las fuerzas que actúan sobre el cuerpo.
- **Cinética:** La cinética se refiere al estudio de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo y cómo estas fuerzas influyen en el movimiento. En el control motor, la cinética se ocupa de las fuerzas musculares, inercia, fricción y otras fuerzas que afectan el movimiento de un objeto o un ser humano. La cinética es esencial para comprender cómo los músculos y las articulaciones generan y controlan el movimiento, así como para analizar cómo las fuerzas externas, como la gravedad, afectan la biomecánica del cuerpo.

Acto y Control motor

- **La Corteza motora** es la región de la corteza cerebral involucrada en la planificación, control y ejecución de movimientos voluntarios. Clásicamente la corteza motora es un área del lóbulo frontal situado en la circunvolución precentral dorsal inmediatamente anterior al surco central.
- **Los ganglios basales** principalmente en la selección de la acción; ayudan a decidir cuál ejecutar entre diferentes comportamientos posibles. La función principal de los ganglios basales es controlar y regular las actividades de las áreas corticales motora y premotora de manera que los movimientos voluntarios se realicen sin problemas.
- **El cerebelo** desempeña un papel importante en el control motor. No inicia el movimiento, pero contribuye a la coordinación, la precisión y la sincronización exacta. También puede participar en algunas funciones cognitivas como la atención y el lenguaje, y en la regulación de las respuestas de miedo y placer pero sus funciones relacionadas con el movimiento son las más sólidamente establecidas.

DESCENDING SYSTEMS

Upper motor neurons

Motor cortex

Planning, initiating, and directing voluntary movements

Brainstem centers

Rhythmic, stereotyped movements and postural control

BASAL GANGLIA

Initiation of intended movement and suppression of unwanted movement

CEREBELLUM

Coordination of ongoing movement

Local circuit neurons

Sensorimotor integration and central pattern generation

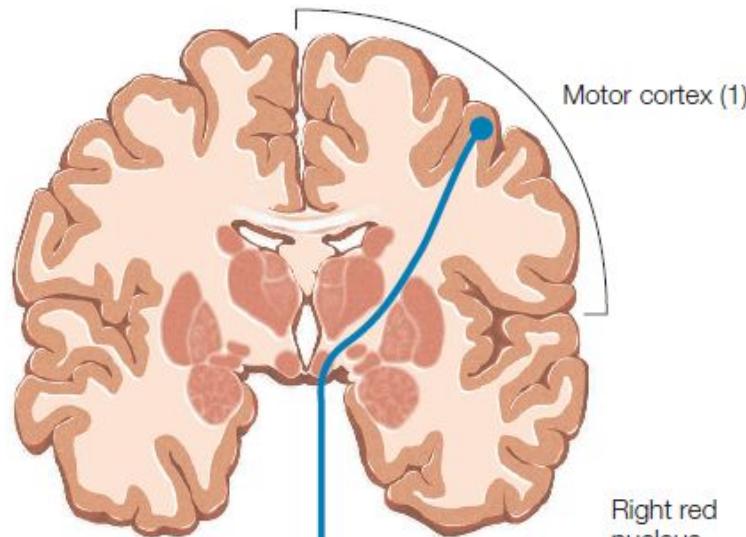
Motor neuron pools

Lower motor neurons

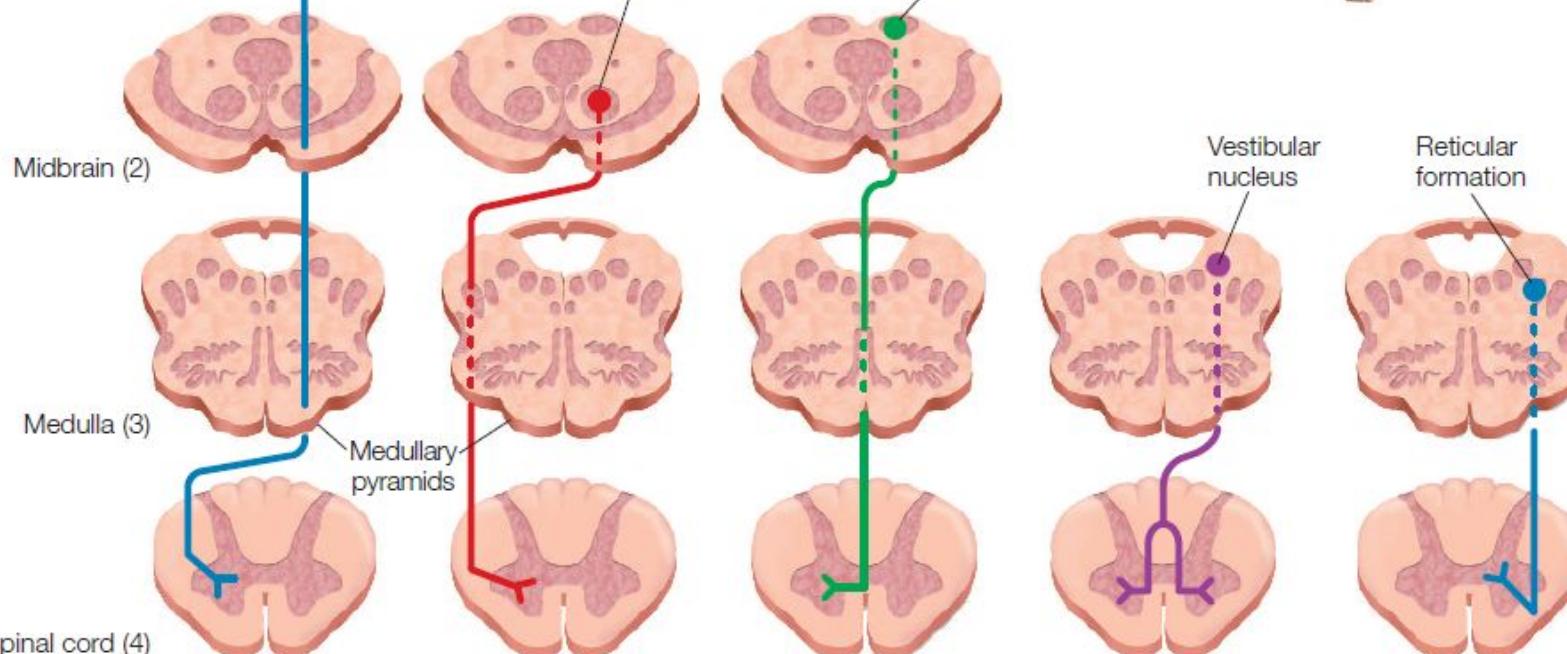
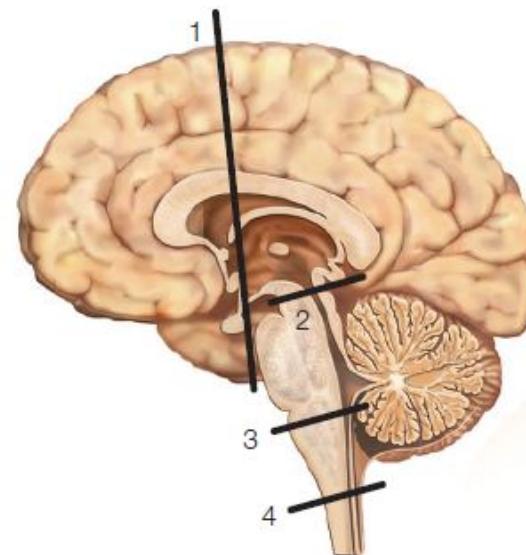
SPINAL CORD AND BRAINSTEM CIRCUITS

Sensory inputs

Skeletal muscles



Motor cortex (1)



Corticospinal

Rubrospinal

Tectospinal

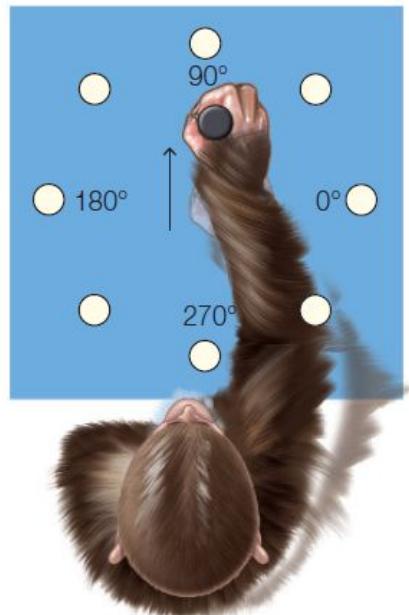
Vestibulospinal

Reticulospinal

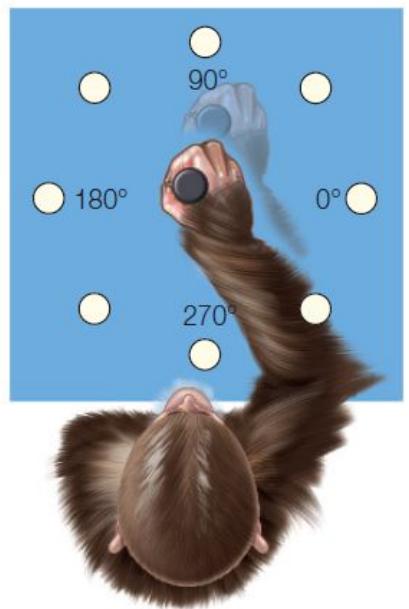
Pyramidal
tract

Extrapyramidal
tracts

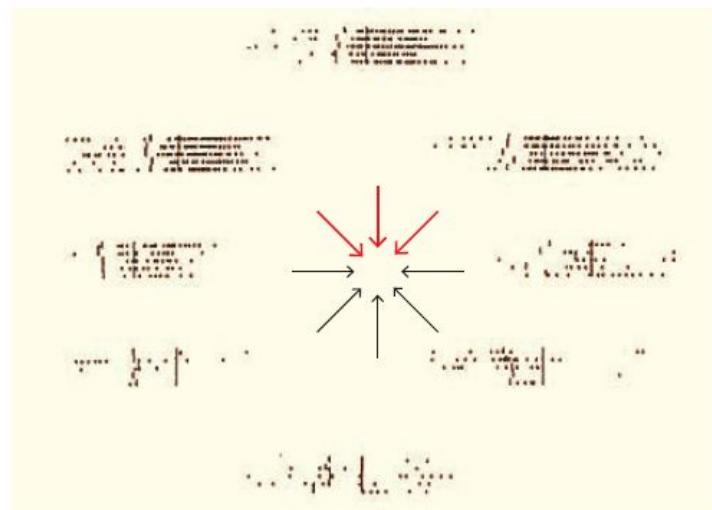
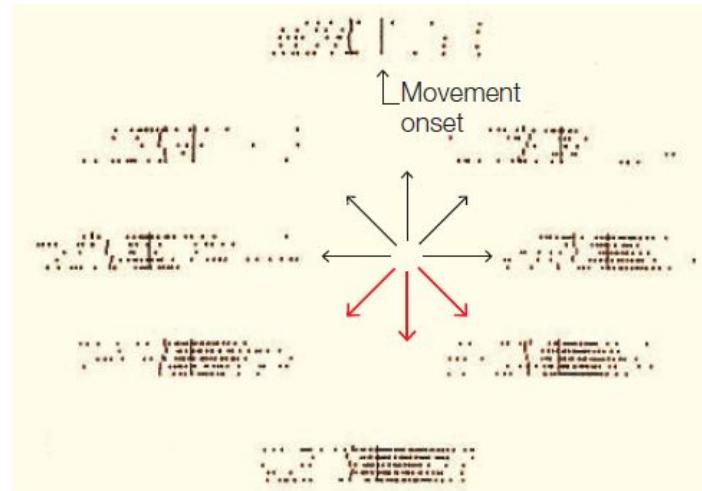
Codificación neural del movimiento



a

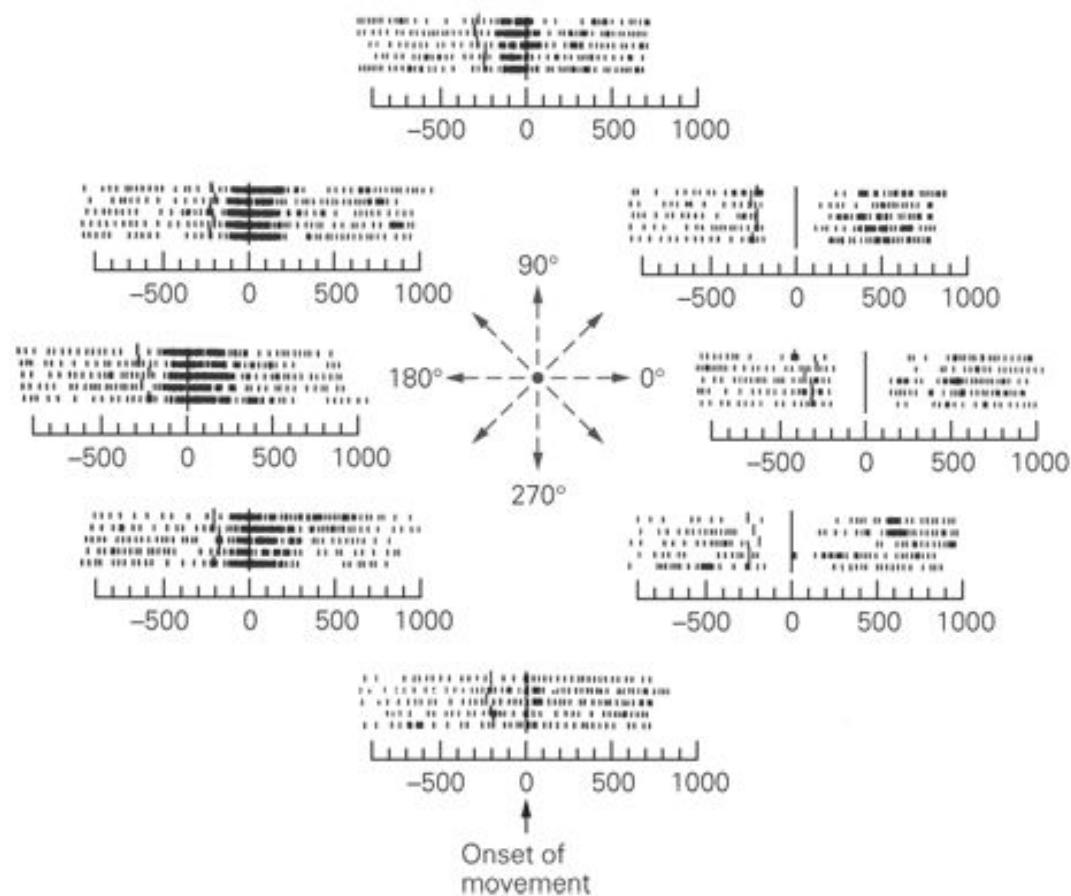


b

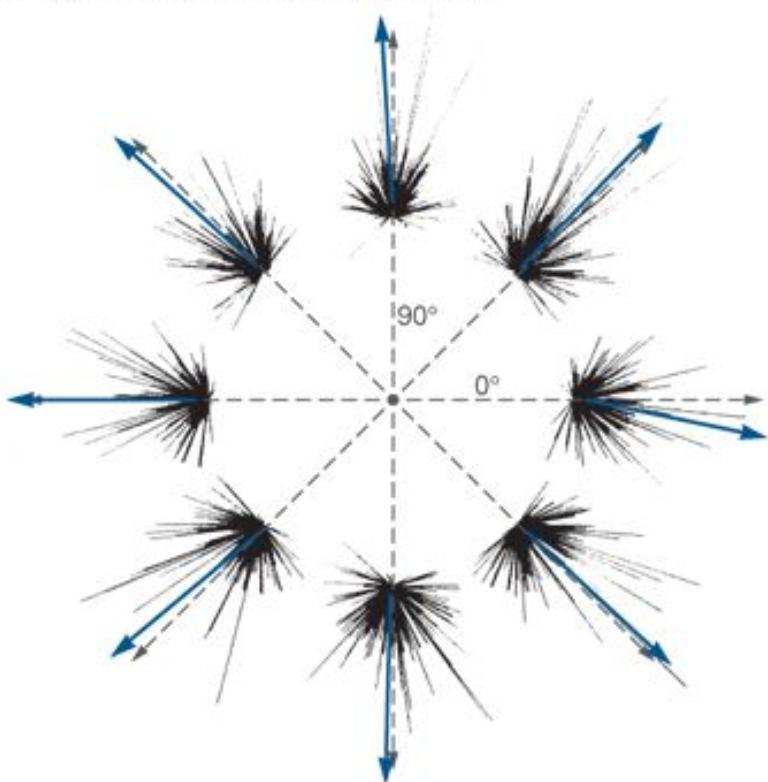


Codificación vectorial en la corteza motora

A Single primary motor cortex neuron

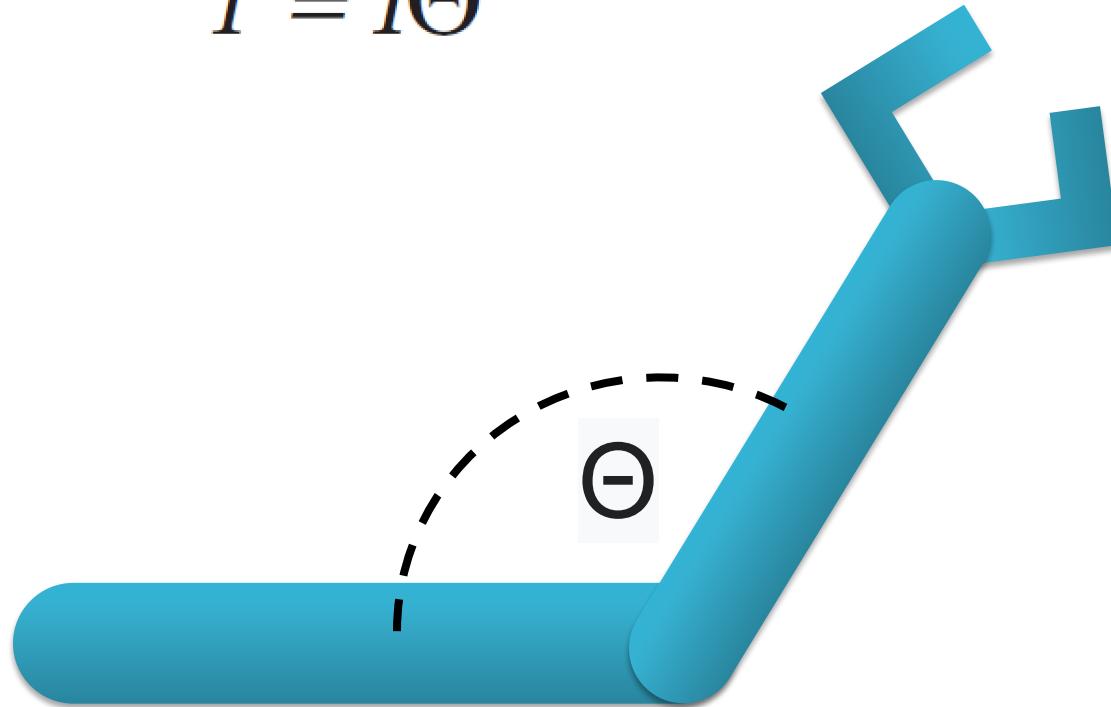


B Motor cortex neuronal population

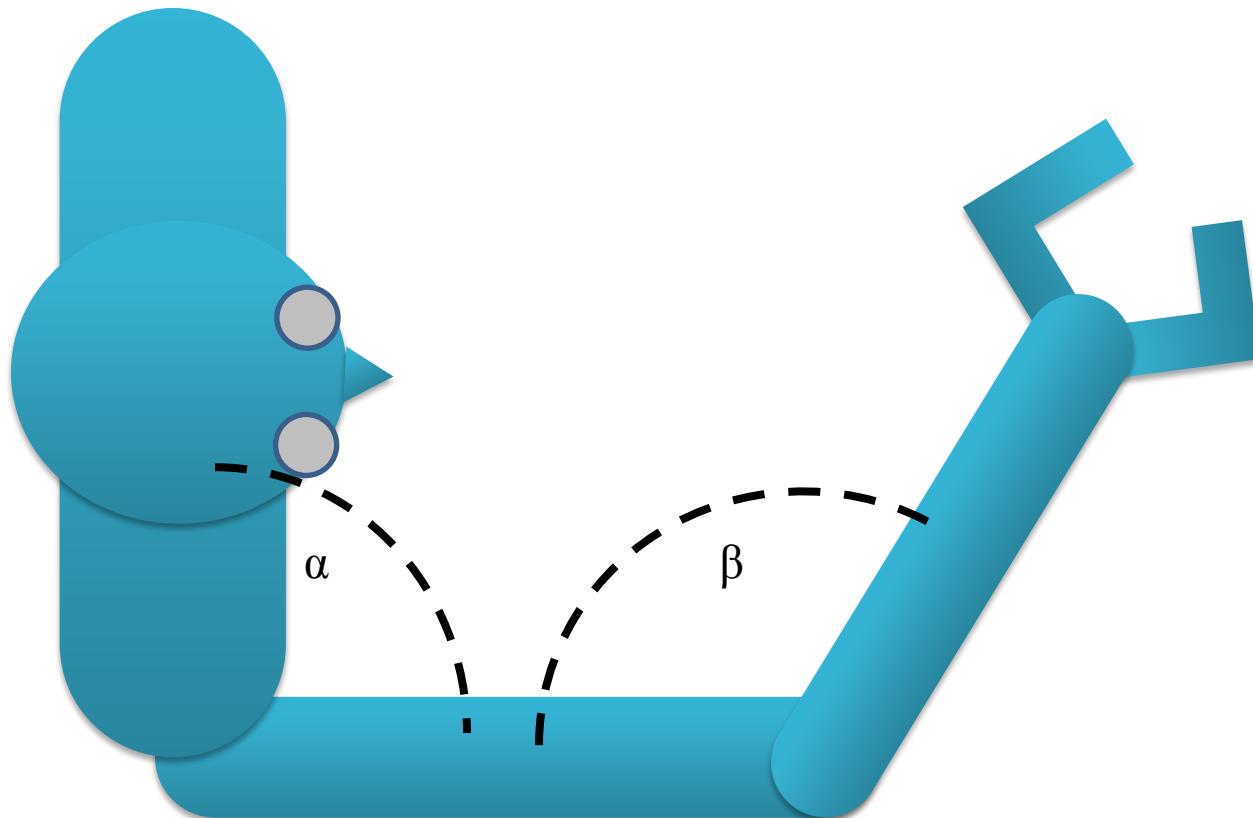


Torque muscular

$$T = I\ddot{\Theta}$$



Control motor

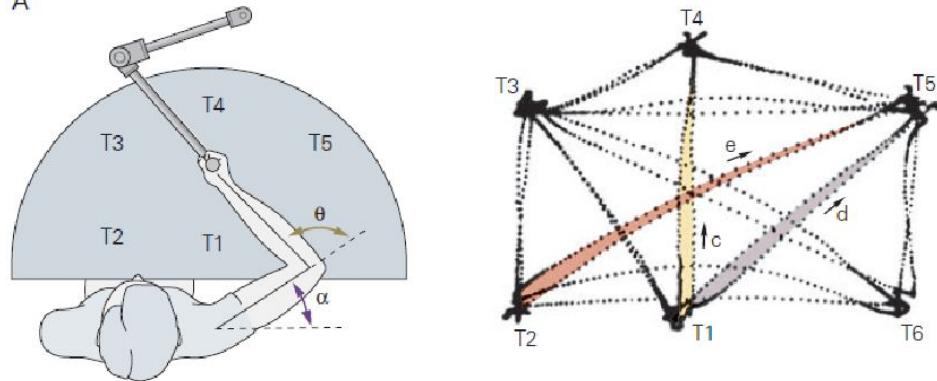


Torque muscular

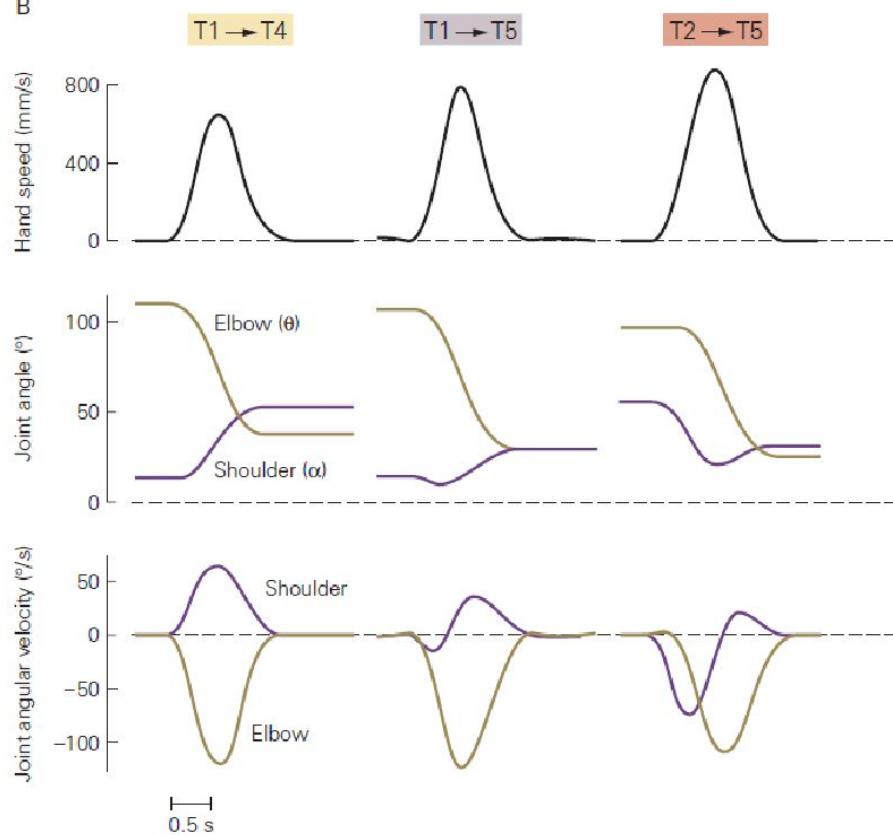
$$T_s = (I_1 + I_2 + m_1 c_1^2 + m_2 (l_1^2 + c_2^2 + 2l_1 c_2 \cos\Theta_e)) \ddot{\Theta}_s \\ + (I_2 + m_2 c_2^2 + m_2 l_1 c_2 \cos\Theta_e) \ddot{\Theta}_e - (m_2 l_1 c_2 \sin\Theta_e) \dot{\Theta}_e^2 - \\ (2m_2 l_1 c_2 \sin\Theta_e) \dot{\Theta}_s \dot{\Theta}_e$$

$$T_e = (I_2 + m_2 c_2^2 + m_2 l_1 c_2 \cos\Theta_e) \ddot{\Theta}_s + \\ (I_2 + m_2 c_2^2) \ddot{\Theta}_e + (m_2 l_1 c_2 \sin\Theta_e) \dot{\Theta}_s^2$$

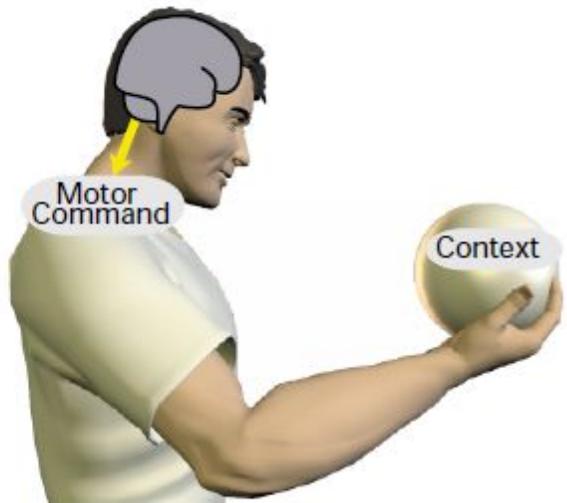
A



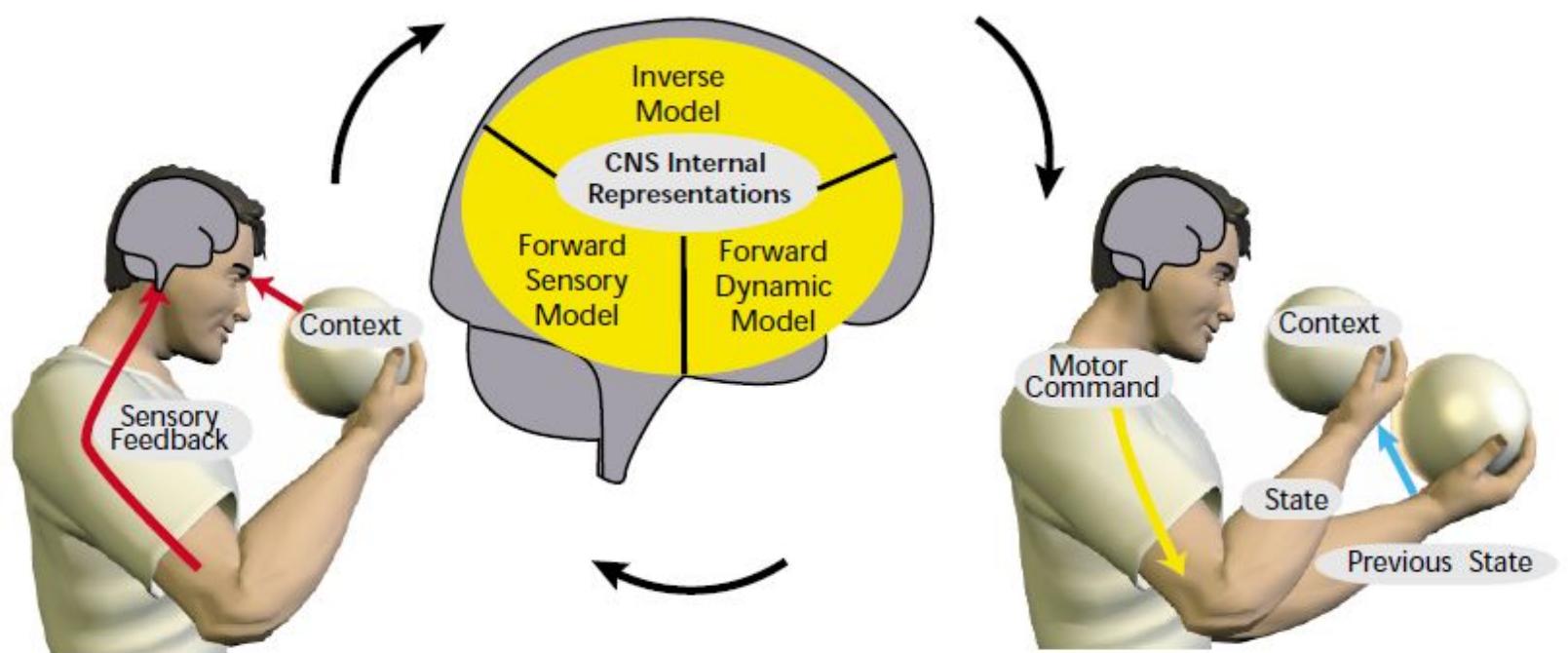
B



- La información **cinemática** incluye la posición, la velocidad y la aceleración de la mano, los ángulos de las articulaciones y las longitudes de los músculos sin referencia a las fuerzas que los causan.
- La información **cinética** se refiere a las fuerzas generadas o experimentadas por nuestro cuerpo. Estas diferentes formas de información intrínseca son proporcionadas por diferentes sensores.



[task, state, context] → motor command



[state, motor command, context] → sensory feedback

[previous state, motor command, context] → state

A Locate hand and cup
(egocentric coordinates)

B Plan hand movement
(endpoint trajectory)

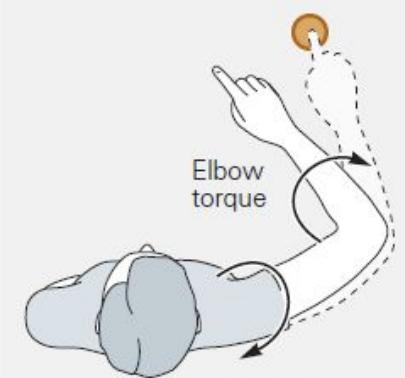
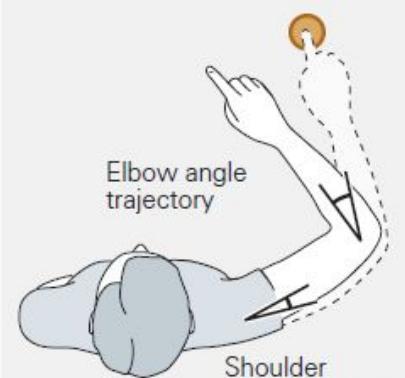
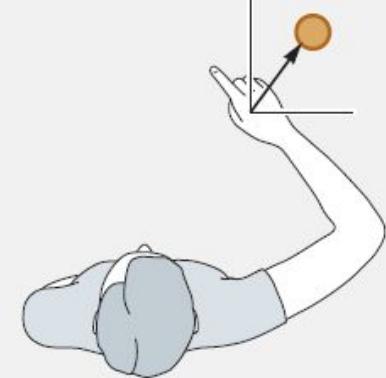
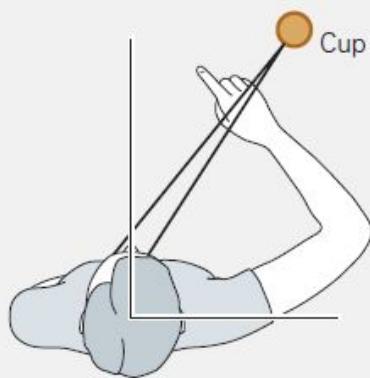
C Determine intrinsic plan
(joint trajectory)

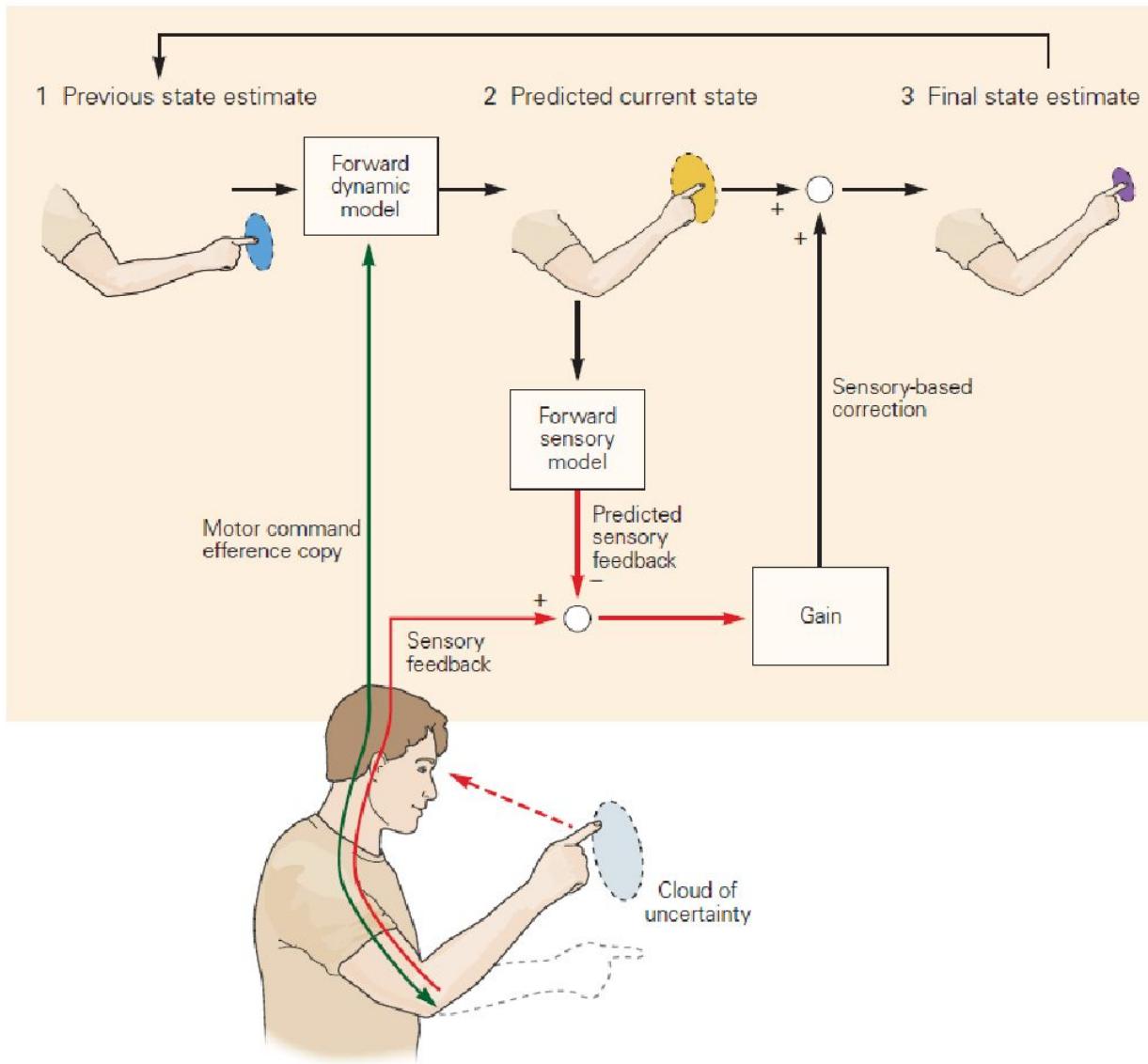
D Execute movement
(joint torques)

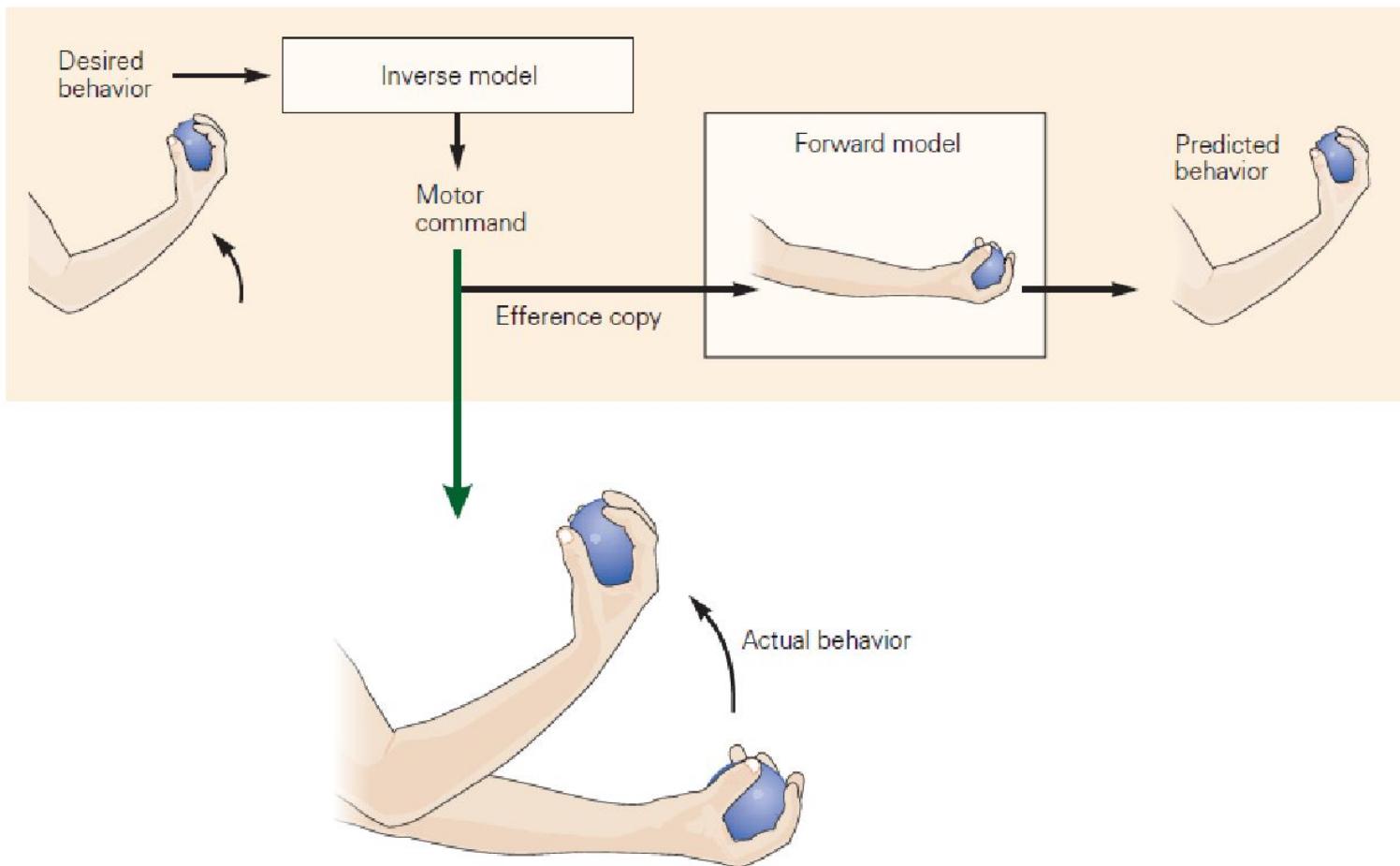
Movement planning

Inverse kinematics

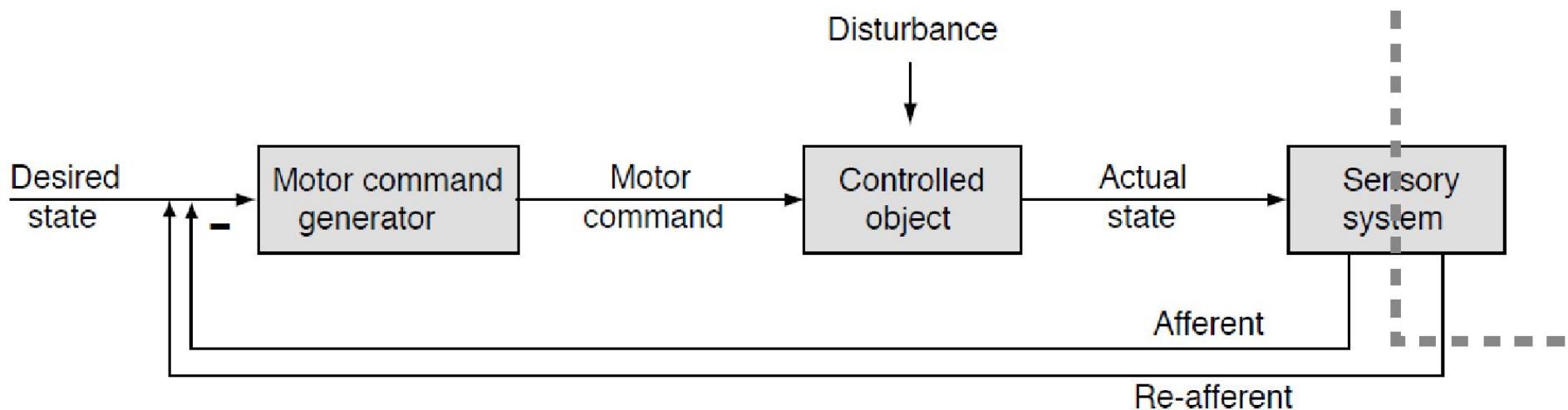
Inverse dynamics







Control de retroalimentación negativa y elementos de un sistema de control estándar



- El generador de comandos motores puede ser visto como un modelo inverso de la dinámica del objeto controlado ya que toma una señal de estado y debe producir el comando motor correcto de modo que el objeto controlado termine en el estado deseado.

Control en bucle cerrado y en bucle abierto

- Un sistema de bucle cerrado tiene retroalimentación, detección de errores y corrección de errores como elementos clave. Hay una referencia que especifica el valor deseado para el sistema y la salida del sistema se retroalimenta y se compara con la referencia para la detección de errores y, si es necesario, se corrige. Un sistema de bucle cerrado se auto-regula compensando las desviaciones de la referencia
- Un sistema de bucle abierto no tiene retroalimentación o mecanismos para la corrección de errores. El sistema efectúa su transformación sobre la entrada y el sistema produce una salida. El sistema no tiene capacidad compensatoria

Copia eferente

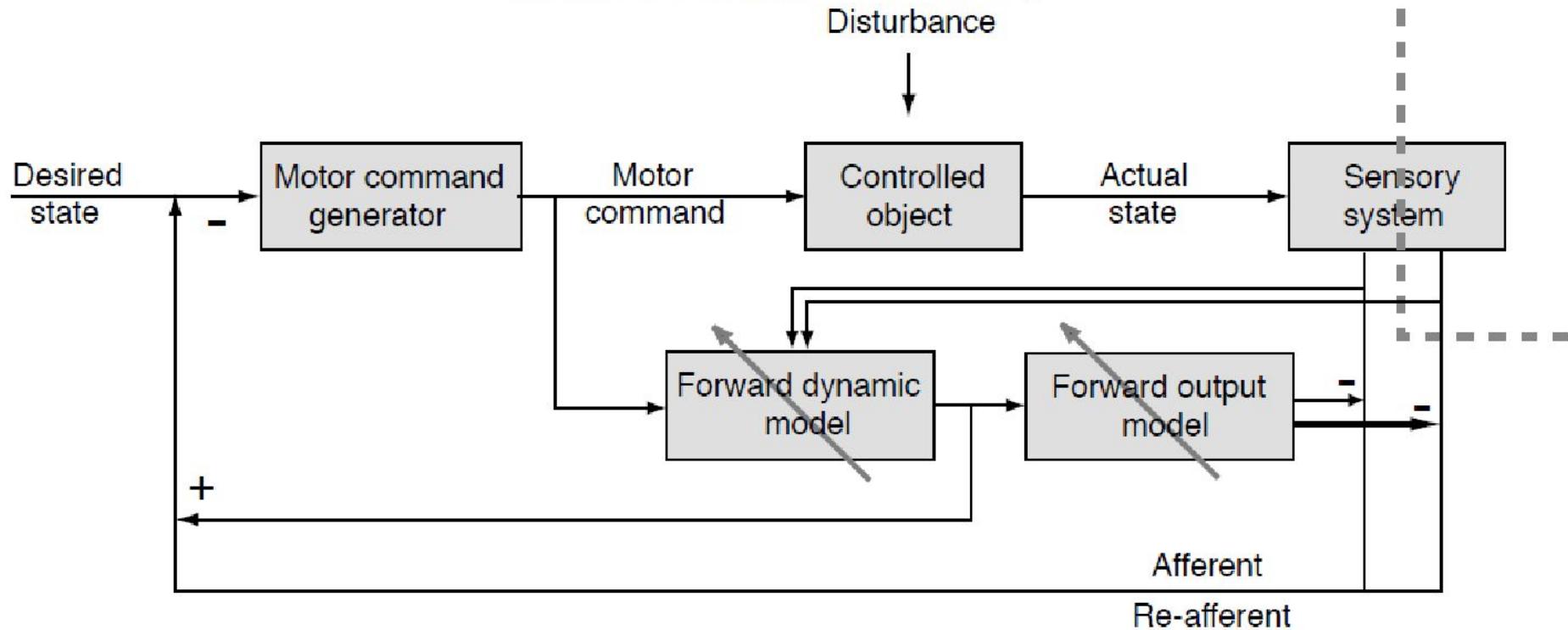
- Totalmente análogas al concepto de feedforward son las nociones de copia eferente (von Hoist, 1954) y descarga corolaria (Sperry, 1950, Teuber, 1964).
- En el contexto del control motor, la copia eferente puede ser utilizada para comparar la intención de un movimiento con su ejecución real, lo que permite corregir y ajustar el movimiento en tiempo real. Esto es importante en la coordinación motora y en la ejecución de movimientos precisos.
- Los movimientos activos y voluntarios involucran dos conjuntos de señales, las cuales funcionan por medio de la operación feedforward:
 - la descarga descendente a los órganos efectores
 - una descarga central simultánea a la de los sistemas motores a los sensores que los prepara para las consecuencias previstas del acto motor.

- Los modelos internos «forward» pueden predecir las consecuencias sensoriales a partir de las copias eferentes de los comandos motores.
- Por otro lado, los modelos internos inversos pueden calcular los comandos motores «feedforward» necesarios a partir de la información de la trayectoria deseada.

- El sistema nervioso central debe ejercer control y predicción para lograr un buen rendimiento en la destreza motora.
- La predicción y el control son dos caras de la misma moneda, y los dos procesos se correlacionan exactamente con los modelos directo e inverso.
- La predicción convierte los comandos motores en consecuencias sensoriales esperadas, mientras que el control convierte las consecuencias sensoriales deseadas en comandos motores.

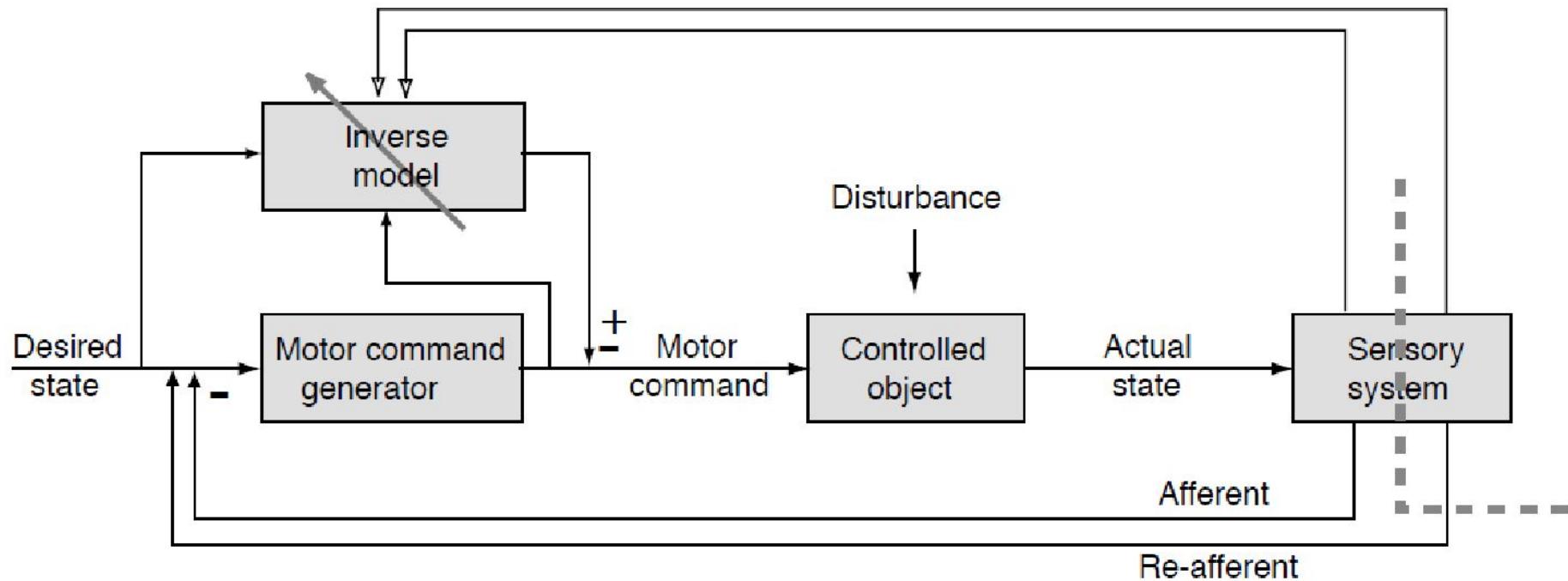
El modelo directo

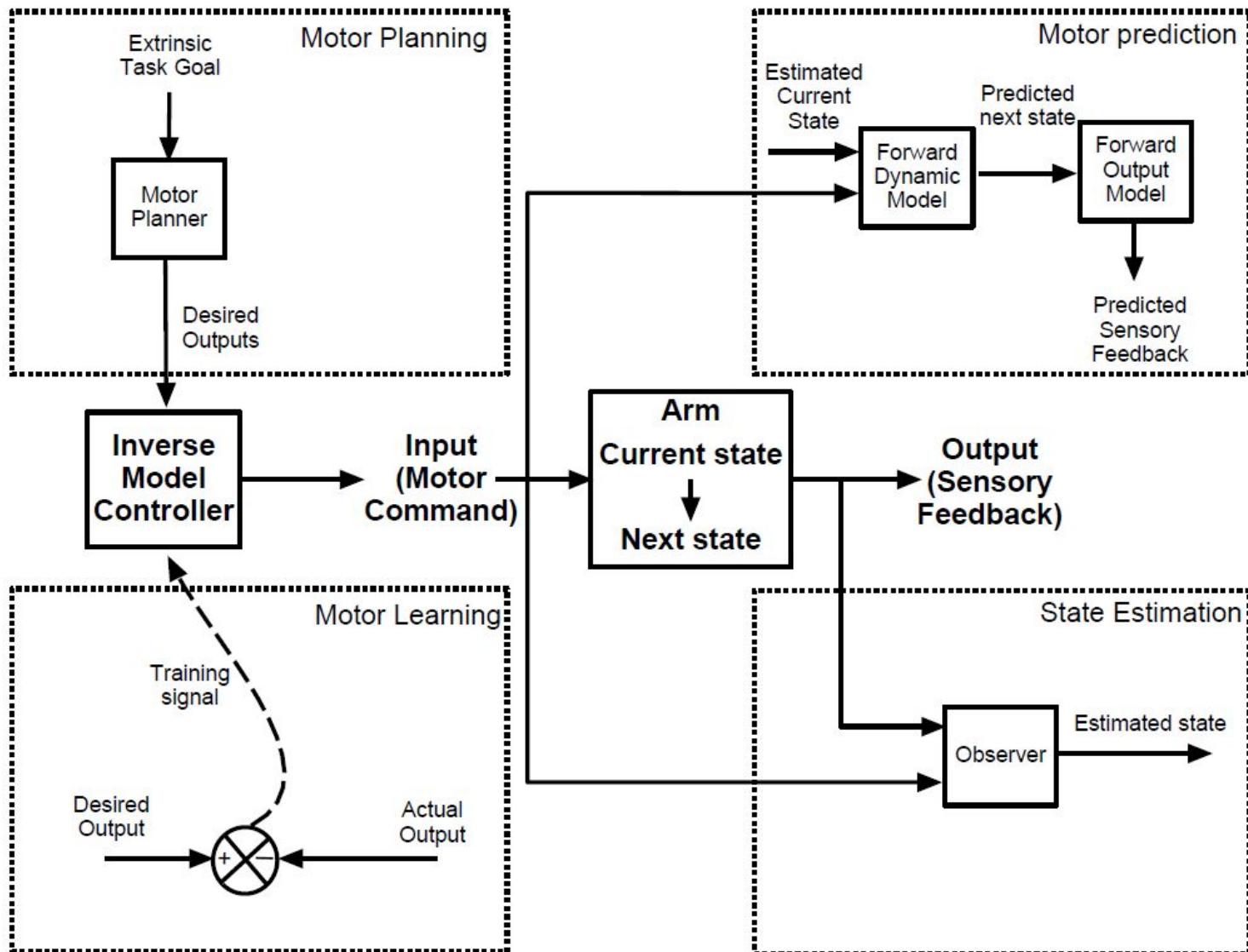
A. The forward model controller



El modelo inverso

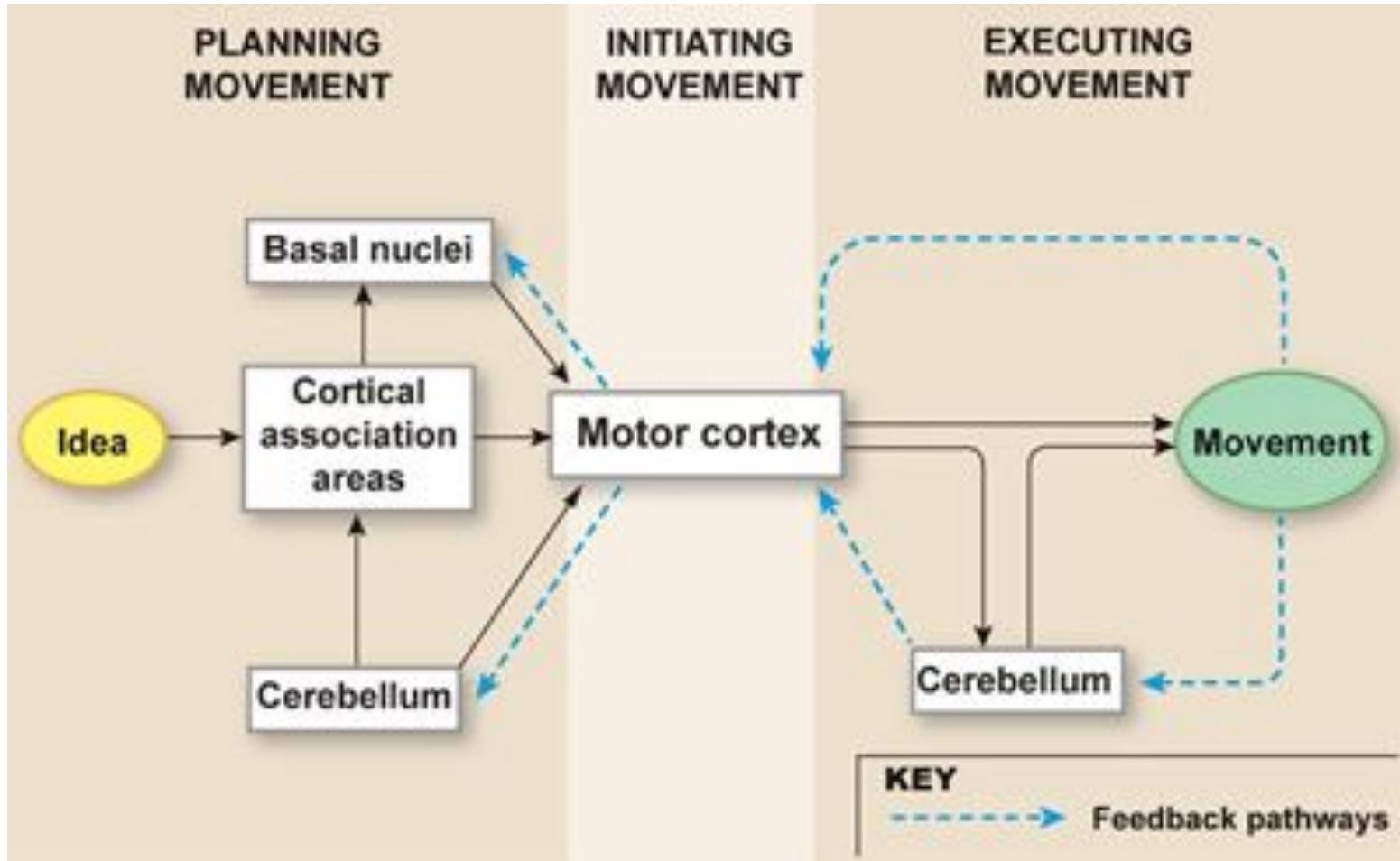
B. The inverse model controller





Cerebelo: Generalidades

- El cerebelo constituye sólo un 10% del volumen total del cerebro, pero contiene más de la mitad de sus neuronas.
- La estructura comprende una serie de unidades altamente regulares que se repiten, cada una de los cuales contiene el mismo microcircuito básico.
- Diferentes regiones del cerebelo reciben proyecciones de diferentes partes del cerebro y la médula espinal y proyectan a diferentes sistemas motores.
- La similitud de la arquitectura y de la fisiología en todas las regiones del cerebelo implica que las diferentes regiones del cerebelo realizan operaciones computacionales similares sobre diferentes entradas.

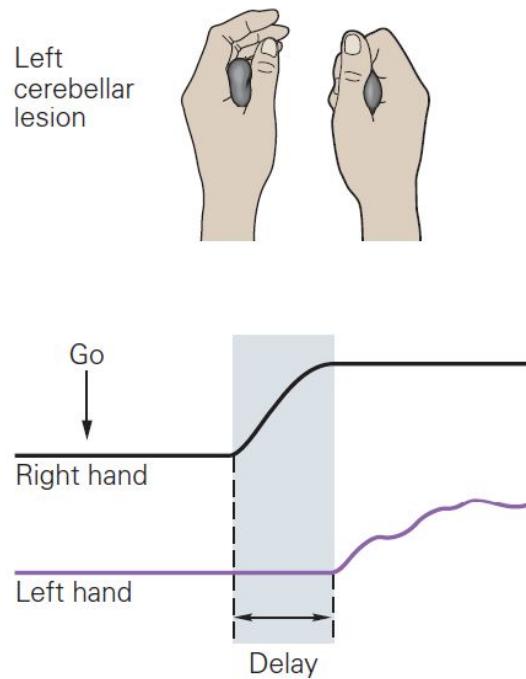


Lesiones cerebelosas

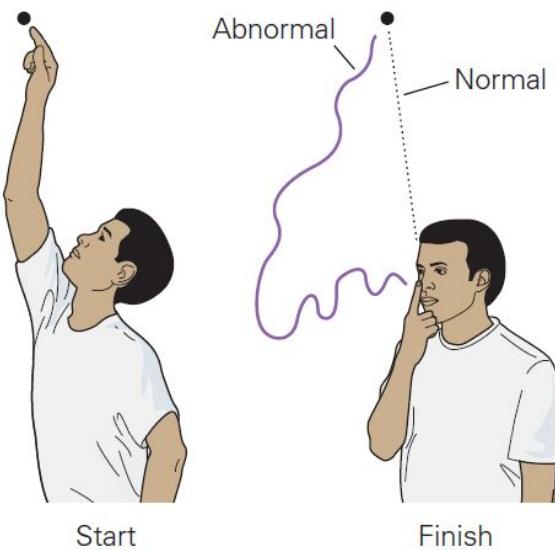
- Trastornos del cerebelo humano resultan en perturbaciones del movimiento normal, descrito originalmente por Joseph Babinski en 1899 y por Gordon Holmes en el 1920.
- Estos trastornos contrastan con la parálisis causada por el daño a la corteza cerebral.
- Aún no está dilucidada por completo la relación de la estructura del cerebelo y la función normal con los síntomas de daño cerebelar en los seres humanos, pero el hecho de que los movimientos se perturben en lugar de ser abolidos y la naturaleza de las disrupciones son pistas importantes sobre la función del cerebelo.

Defectos típicos observados en trastornos cerebelosos

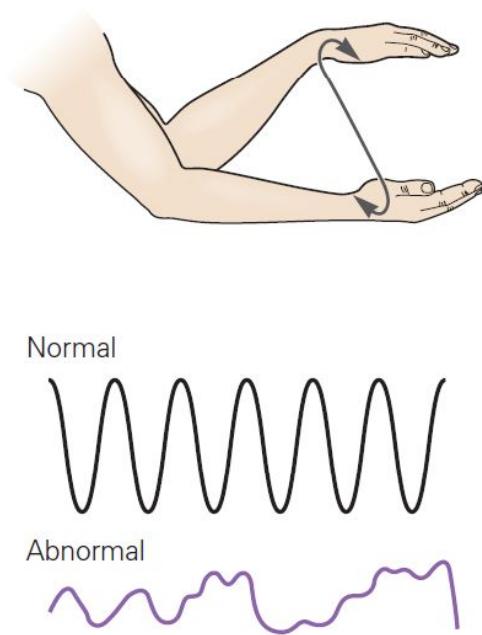
A Delayed movement



B Range of movement errors



C Patterned movement errors

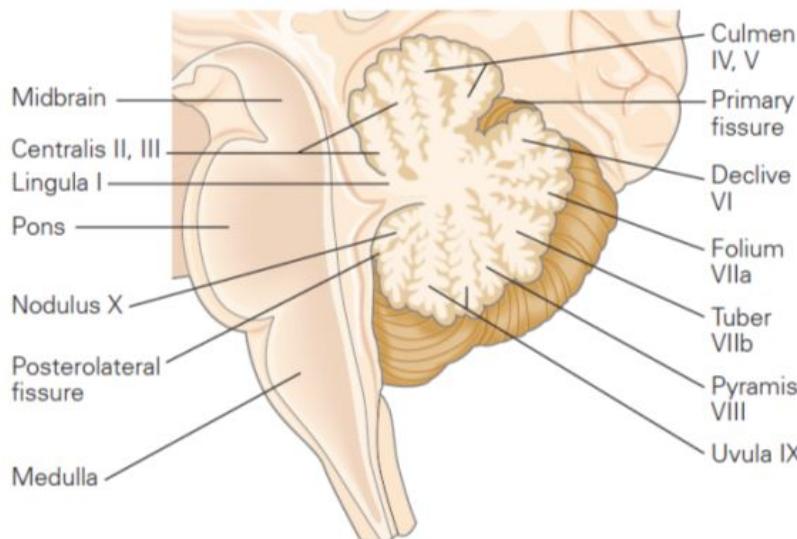


Trastornos cerebelosos se manifiestan en cuatro síntomas:

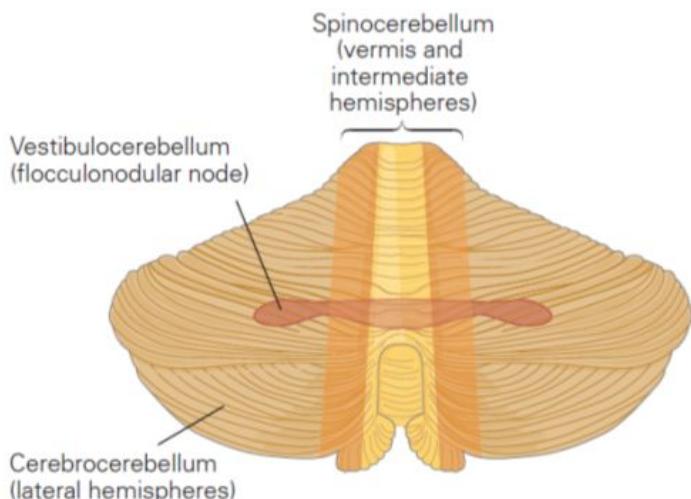
- **Hipotonía**, resistencia disminuida a desplazamientos pasivos de los miembros
- **Astasia-abasia** refiere a la incapacidad ya sea de mantener una postura, permanecer de pie o de caminar de manera normal.
- **Ataxia**, la ejecución anormal de movimientos voluntarios multiarticulares
- **Tremor terminal o intencional** es el resultado de una serie de correcciones erróneas del movimiento. Una vez que el movimiento va claramente en la dirección equivocada, los intentos de hacer correcciones fracasan repetidamente y la mano oscila irregularmente alrededor del objetivo en un temblor terminal característico.

El cerebelo tiene varias regiones funcionalmente distintas:

C Midsagittal section



D Motor and cognitive functional regions



• Vestíbulo cerebelo

- Recibe entradas vestibulares y visuales y proyecta hacia los núcleos vestibulares en el tronco cerebral. Participa en el equilibrio y otros reflejos vestibulares y en los movimientos oculares.

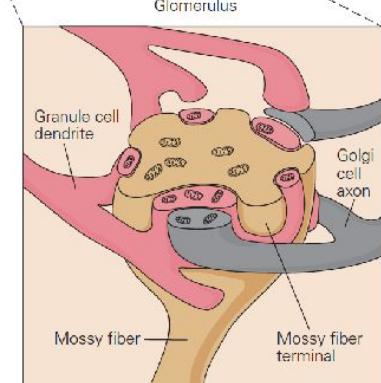
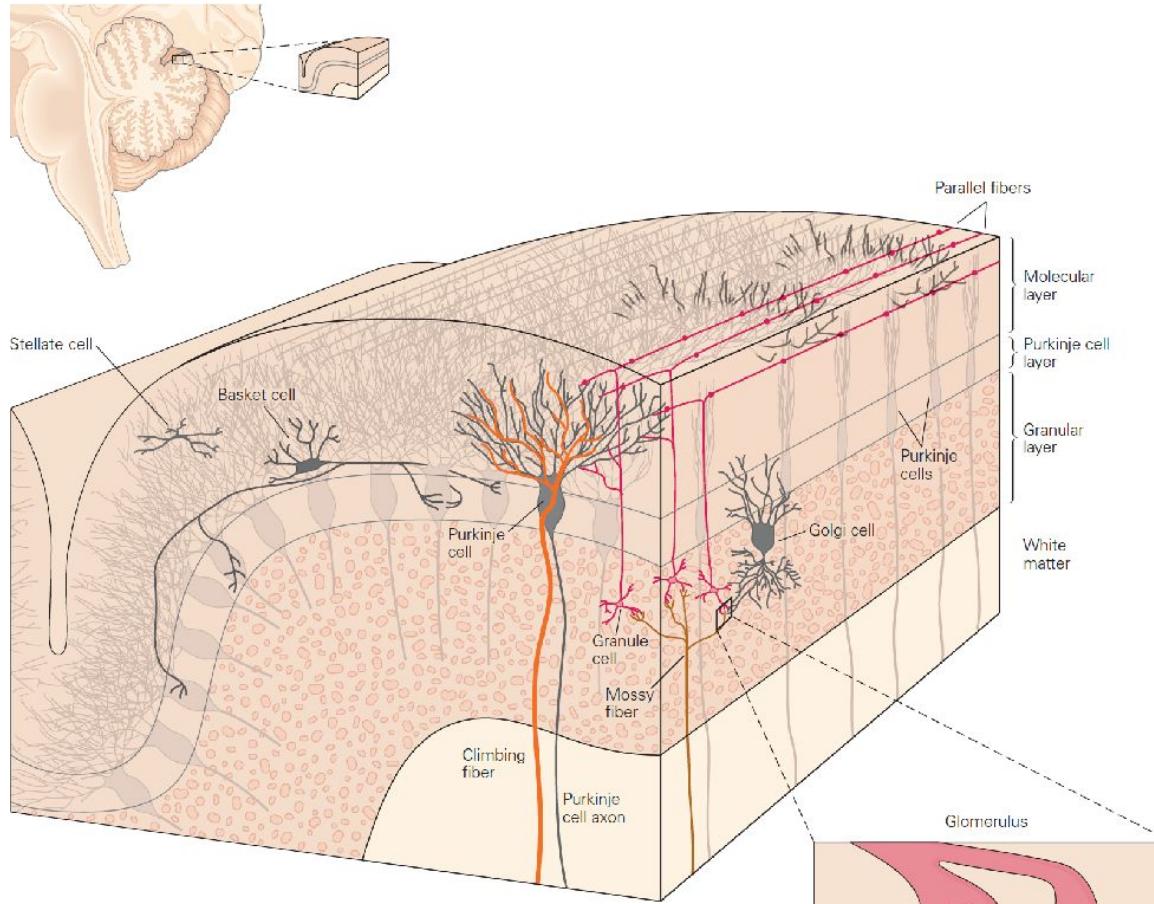
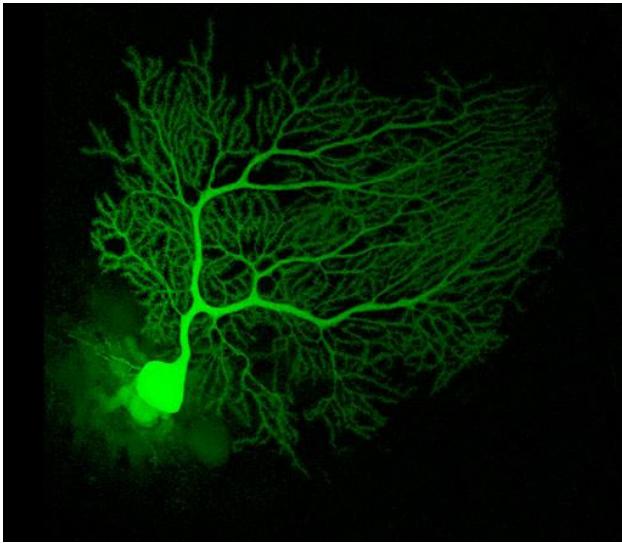
• Espino cerebelo

- Se llama así porque recibe entradas somatosensoriales y propioceptivas de la medula espinal. El vermis recibe entradas visuales, auditivas y vestibulares, así como información sensorial somática de la cabeza y de las partes proximales del cuerpo. Se proyecta a través del n úcleo fastigial a las regiones corticales y del tronco encefálico que dan lugar a los sistemas descendente mediales que controlan los músculos proximales del cuerpo y las extremidades. El vermis gobierna la postura, la locomoción y los movimientos oculares.

• Cerebro cerebelo

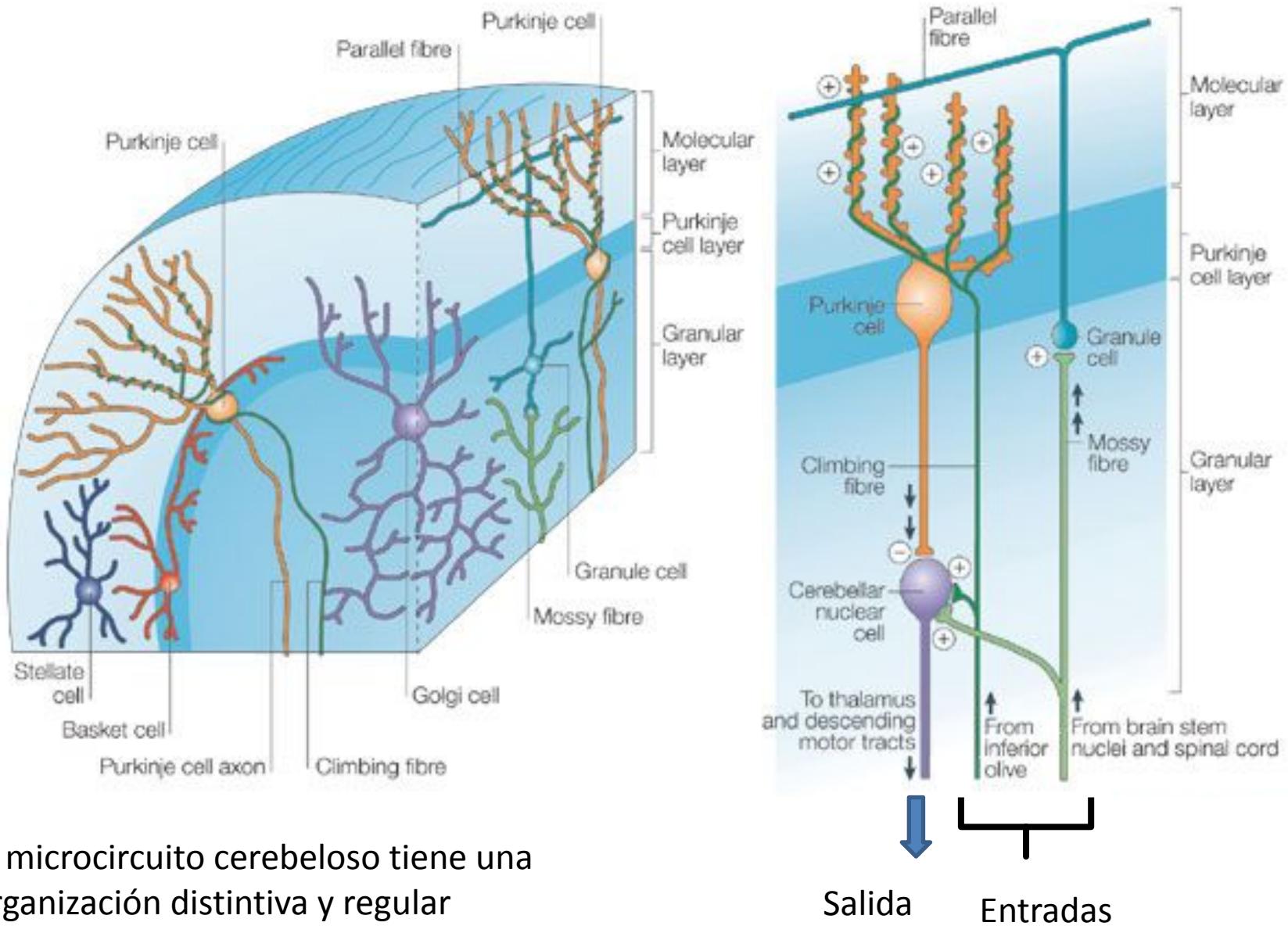
- Comprende las partes laterales de los hemisferios. Estas áreas son filogenéticamente más reciente y son mucho más grandes en los seres humanos y simios que en los monos y los gatos. Casi la totalidad de las entradas y las salidas de esta región implican conexiones con la corteza cerebral. La salida se transmite a través el n úcleo dentado, que proyecta a las áreas motoras, premotoras, y a la corteza prefrontal.

La corteza cerebelosa consta de tres capas



Tal vez la característica más llamativa del microcircuito cortical cerebeloso es que las células de Purkinje (PC), que proporcionan la única salida de la corteza cerebelosa, reciben dos tipos muy diferentes de entrada. Cada PC es contactada directamente por una única fibra trepadora (CF) e indirectamente por miles de fibras musgosas (MFS).

El circuito cerebeloso



El microcircuito cerebeloso tiene una organización distintiva y regular

Fibras musgosas

- Proceden de cuerpos celulares en la médula espinal y el tronco cerebral y llevan información sensorial de la periferia así como información de la corteza cerebral. Forman sinapsis excitadoras en las dendritas de células granulares en la capa granular.
- Cada célula granular recibe entradas de sólo algunos fibras musgosas, pero la arquitectura de los axones de las células granulosas distribuye la información de las fibras musgosas a un gran número de células de Purkinje.
- La entrada de las fibras musgosa es altamente convergente: cada neurona de Purkinje está en contacto con entre 200.000 y un millón de células granulares.

Fibras trepadoras

- Se originan en el núcleo de la oliva inferior y transmiten información sensorial al cerebelo tanto desde la periferia como de la corteza cerebral.
- Se llaman así porque cada una envuelve el cuerpo celular y las dendritas proximales de una neurona de Purkinje como una enredadera en un árbol, por lo que realiza numerosos contactos sinápticos.
- Cada fibra trepadora contacta unas 10 neuronas de Purkinje, pero cada neurona de Purkinje recibe entradas sinápticas de una sola trepadora.
- Los terminales de las fibras trepadoras están dispuestos topográficamente en la corteza cerebelosa: los axones de grupos de neuronas olivares relacionados terminan en delgadas tiras parasagitales que se extienden por varias *folia*. A su vez las neuronas de Purkinje dentro de una banda proyectan a un grupo común de las neuronas nucleares profundas.

Modelo de cerebelo de Marr

- Marr sugirió que el cerebelo es una memoria asociativa.
 - Entrada: información propioceptiva (estado del cuerpo).
 - Salida: comandos motores necesarios para lograr el objetivo asociado con ese contexto.
- Aprende de la experiencia para mapear estados en comandos motores.

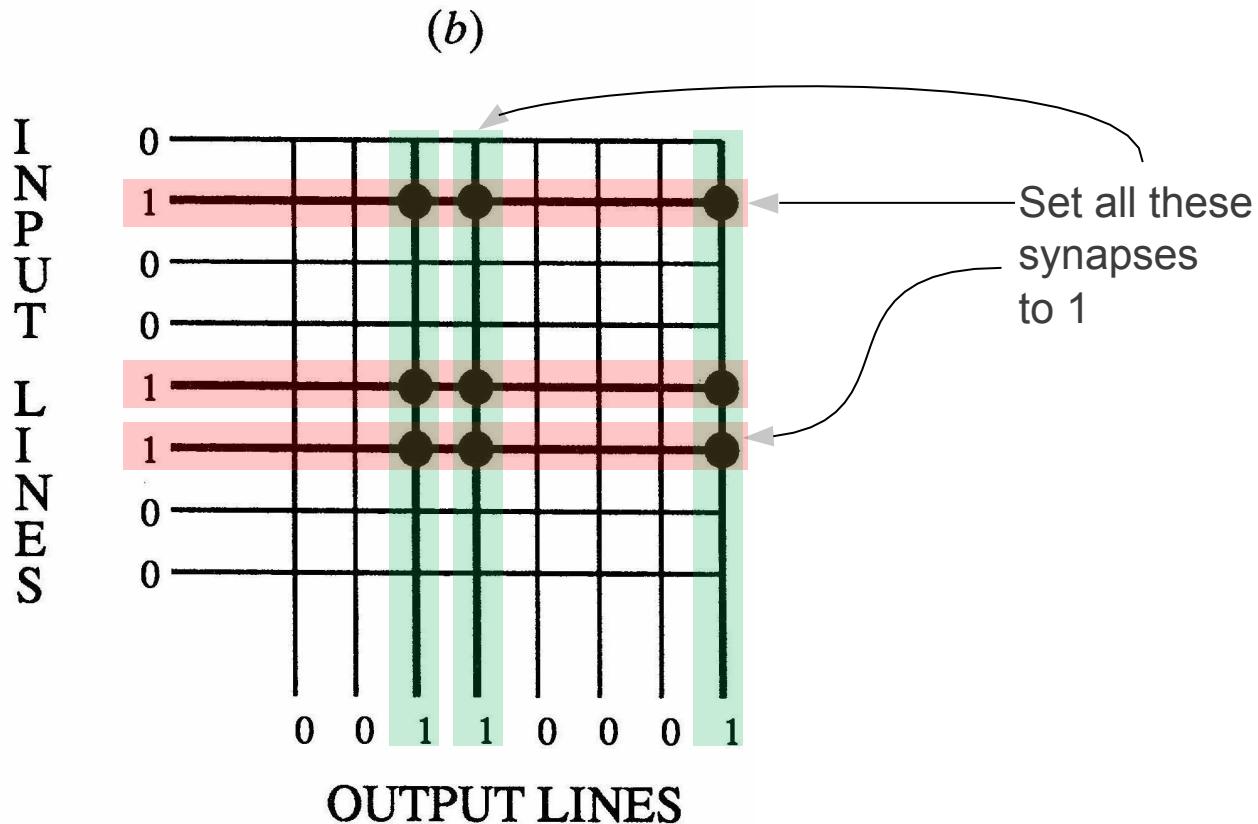
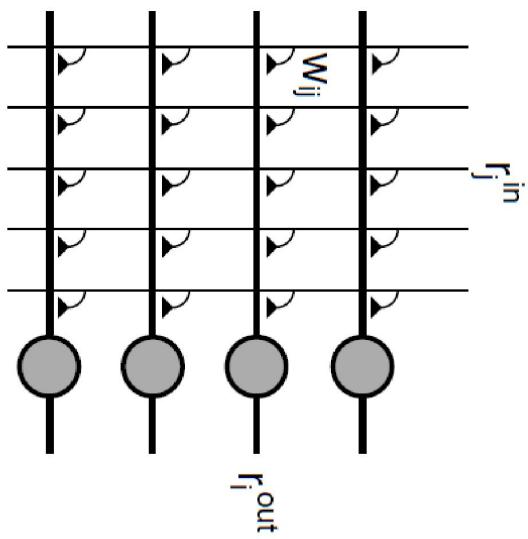
Associators and synaptic plasticity

4

So far, we have neglected some of the most exciting and central mechanisms of brain processing, those of synaptic plasticity and learning in networks. Neurons are connected to form networks, and a neural network is not only characterized by the topology of the network, but also by the *connection strength*, w_{ij} , between two neurons or two population nodes. In this chapter we discuss how connection strengths can be changed in a usage-dependent way through a biological phenomena called *synaptic plasticity*. Synaptic plasticity is the physical basis of learning in neural systems which we will discuss later. Here, we start with a general discussion of *associators*, which summarize the essence of plasticity mechanisms and their importance for cognitive brain processing. We then present the neurophysiological basis of plasticity and some specific models of plasticity. The final part of this chapter discusses

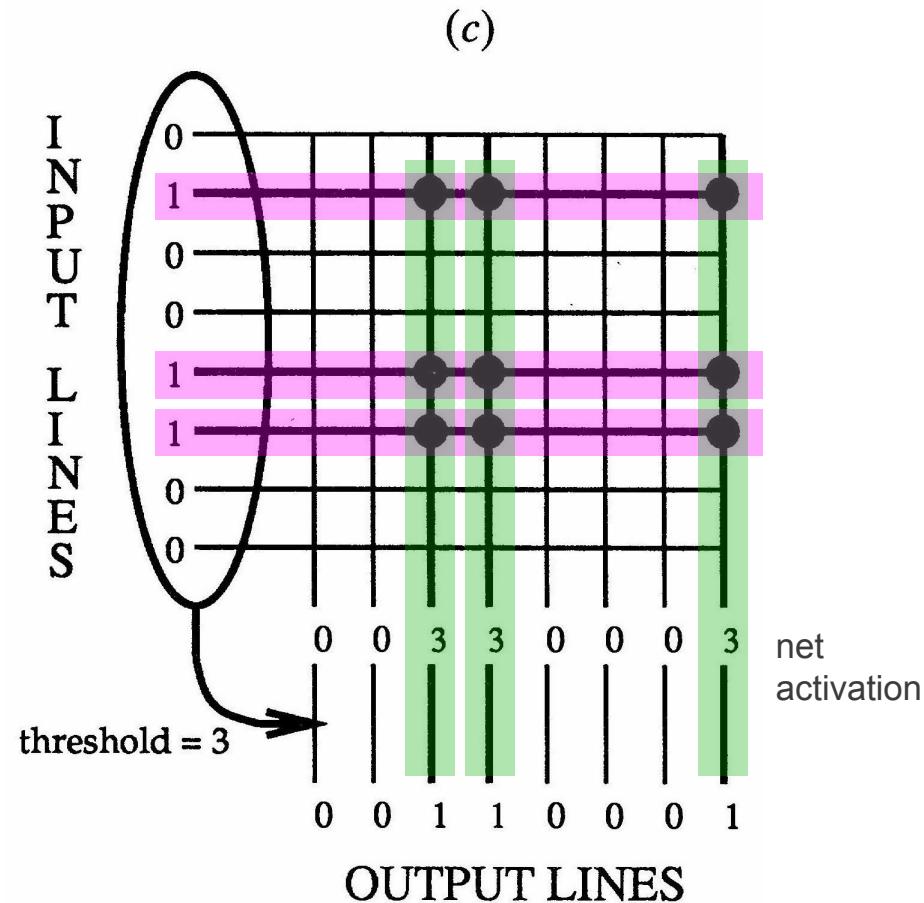
4.1	Associative memory and Hebbian learning	87
4.2	The physiology and biophysics of synaptic plasticity	94
4.3	Mathematical formulation of Hebbian plasticity	99
4.4	Synaptic scaling and weight distributions	105
	Exercises	116
	Further reading	116

Associative Memory: Store a Pattern

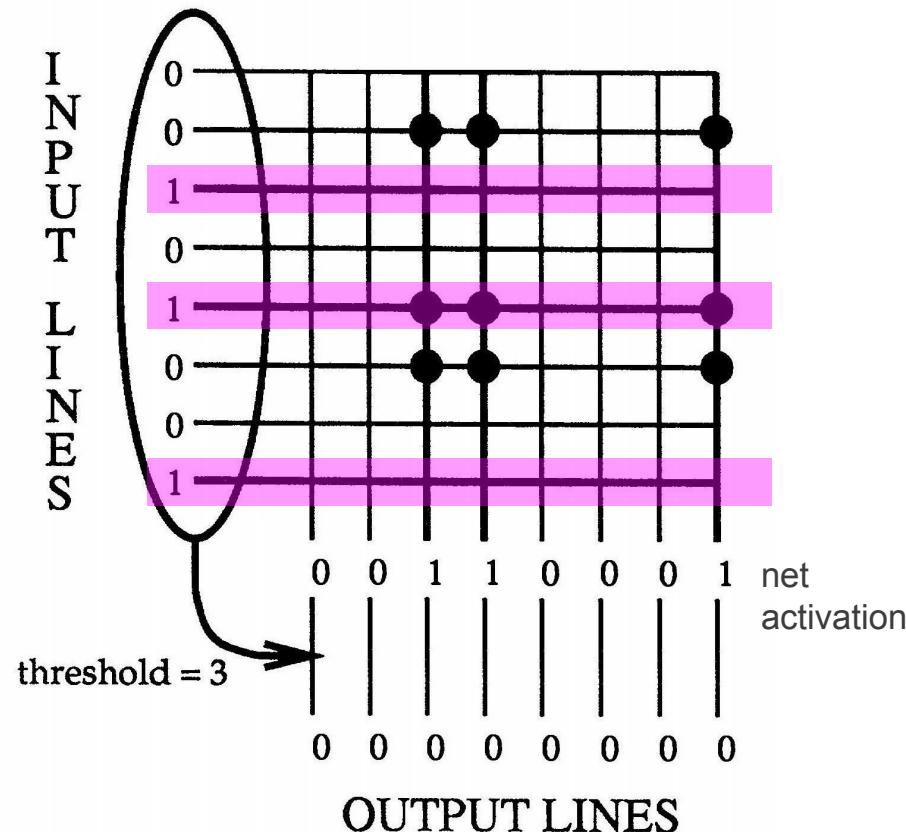


The input and output patterns don't have to be the same length, although in the above example they are.

Associative Memory: Retrieve the Pattern

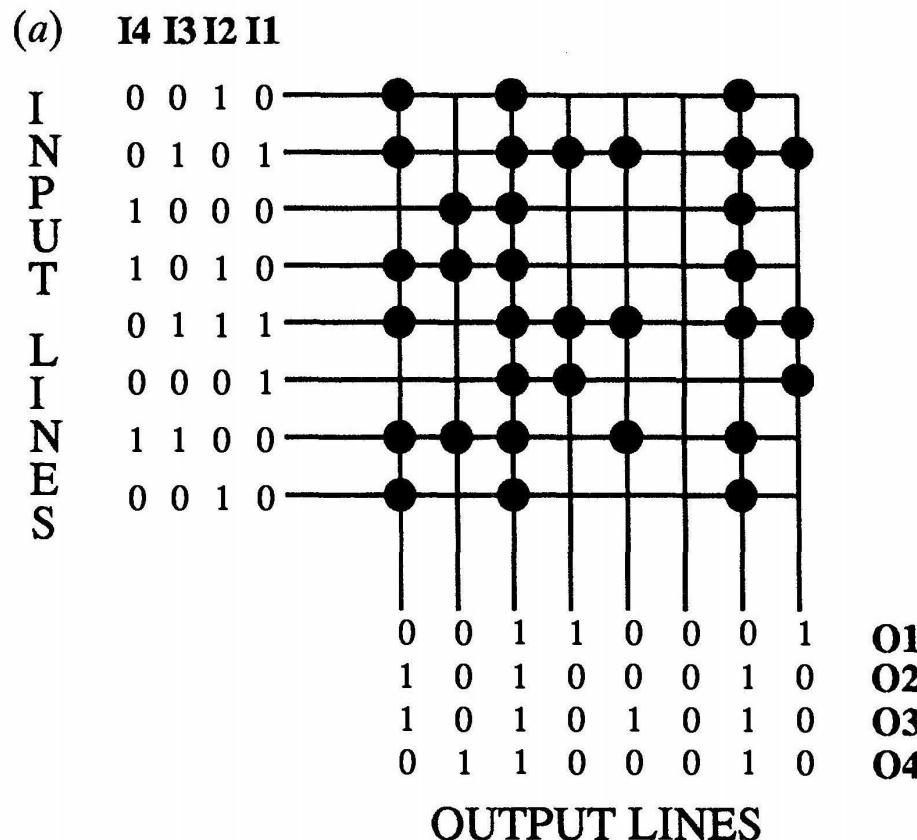


Associative Memory: Unfamiliar Pattern (d)

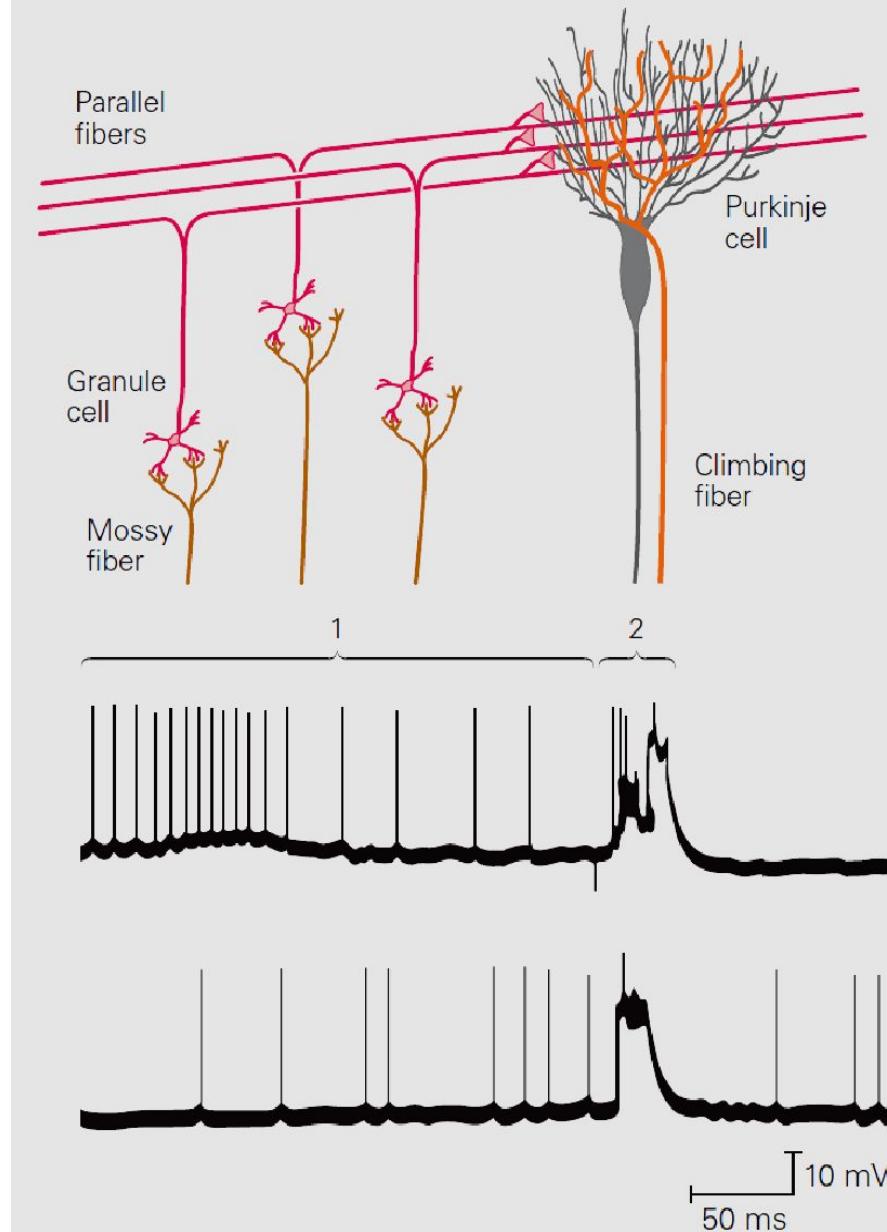


Storing Multiple Patterns

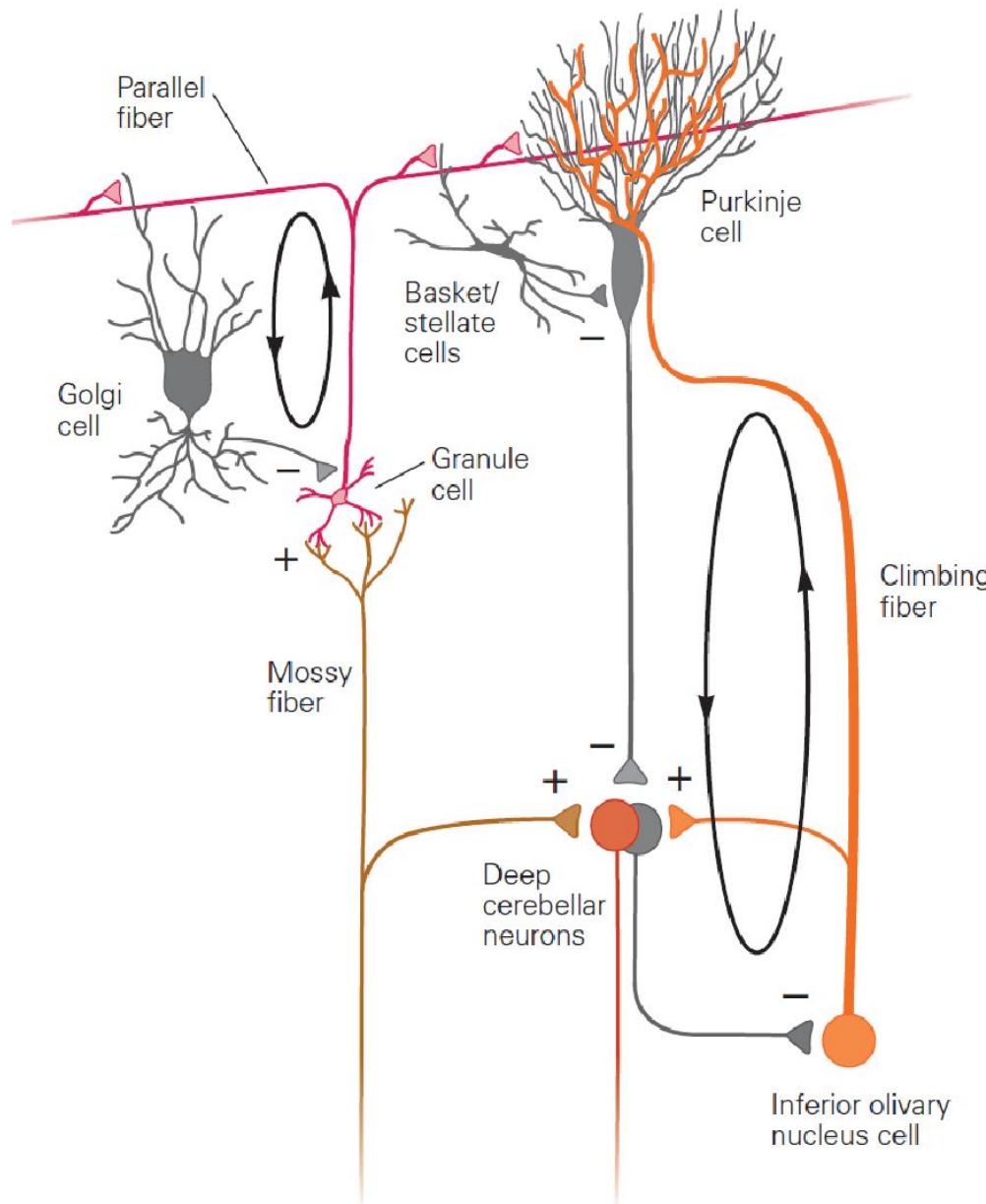
Input patterns
must be dissimilar:
orthogonal or
nearly so. (Is this a
reasonable
requirement?)



Espigas simples y complejas registradas intracelularmente de una célula de Purkinje del cerebelo.



Organización sináptica del microcircuito cerebeloso.



- Las espigas complejas señalan eventos particulares
- La frecuencia de descarga de espigas simples es modulada en forma continua por información sensorial

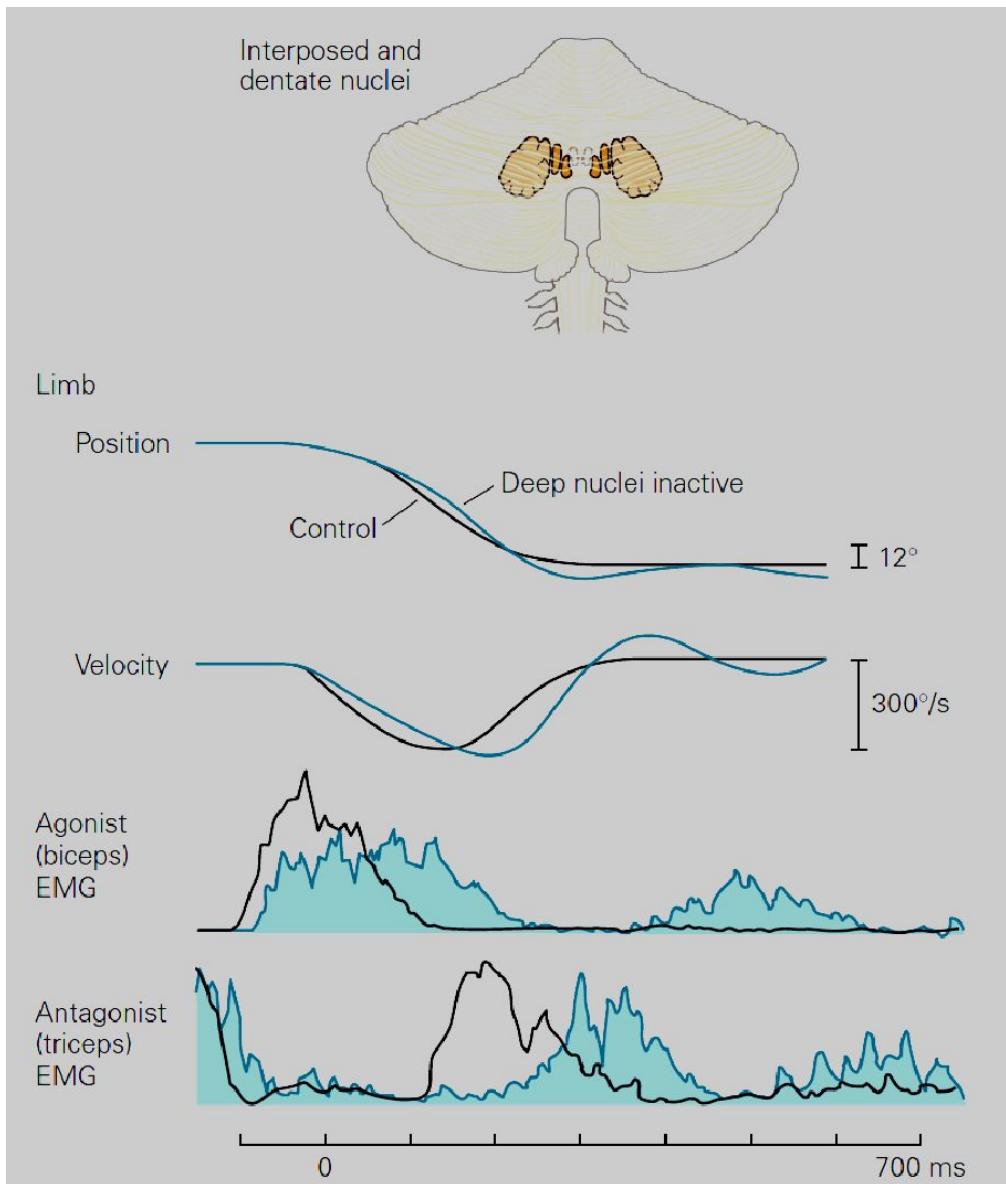
Ilustración de un principio básico de cómo opera el cerebelo

- El **tracto espinocerebeloso dorsal** transmite información somatosensorial de los músculos y los receptores articulares, proporcionando al cerebelo retroalimentación sensorial acerca de las consecuencias del movimiento. Esta información fluye tanto si las extremidades se mueven de forma pasiva o voluntariamente.
- En contraste, el **tracto espinocerebelar ventral** sólo está activo durante los movimientos activos. Sus células de origen reciben los mismos insumos que las neuronas motoras espinales y las interneuronas, y transmite una “**copia eferente**” o “**descarga corolaria**” de la actividad de las neuronas motoras de la médula que informa al cerebelo de los comandos motores ensamblados en la médula espinal.
- Se cree que el cerebelo **compara la información sobre el movimiento previsto con el movimiento real** informado por el tracto espinocerebelar dorsal con el fin de determinar **si el comando motor debe ser modificado** para lograr el movimiento deseado.

La regulación espinocerebelosa del movimiento sigue tres principios de organización:

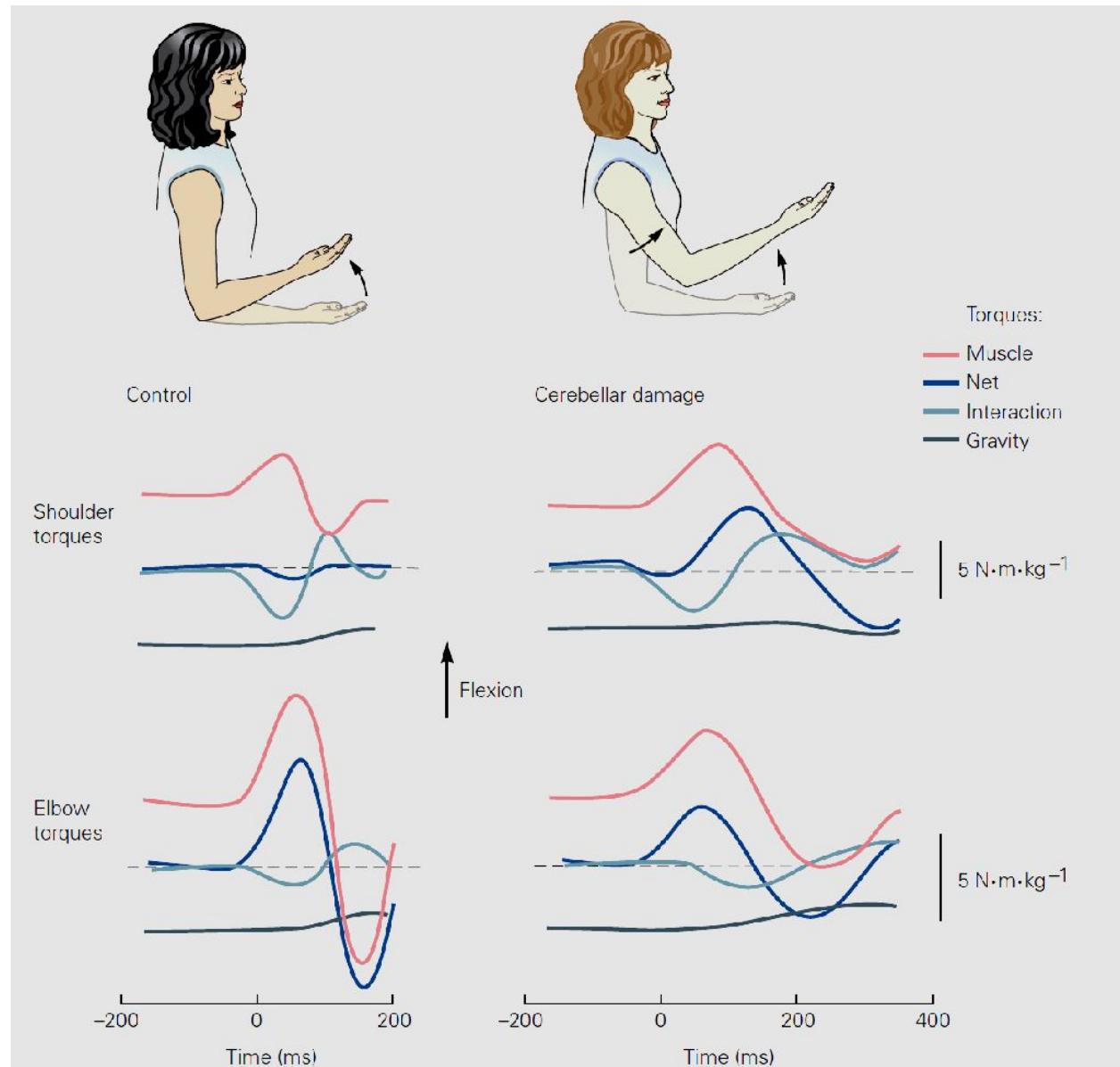
1. Tanto las neuronas de Purkinje del cerebelo como las neuronas de los núcleos profundos descargan vigorosamente en relación con movimientos voluntarios. La salida del cerebelo está relacionada con la dirección y velocidad del movimiento.
2. El cerebelo proporciona un control anticipativo de las contracciones musculares para regular la sincronización de los movimientos. En lugar de esperar la retroalimentación sensorial, la salida del cerebelo se anticipa a las contracciones musculares que se necesitarán para realizar un movimiento suave, preciso y rápido hacia el objetivo deseado.
3. El cerebelo tiene modelos internos de las extremidades que toman automáticamente en cuenta la estructura de las mismas.
 - Un modelo dinámico preciso del brazo puede convertir un punto final deseado en una secuencia de comandos para la contracción muscular correctamente temporizados y escalados.
 - Al mismo tiempo, un modelo cinemático preciso de la relación entre los ángulos de articulación y posición de los dedos puede especificar los ángulos de las articulaciones que son necesarios para alcanzar un punto final.

Los núcleos interpósito y dentado están involucrados en el momento preciso de la activación de músculos agonistas y antagonistas durante los movimientos rápidos.



- Normalmente un movimiento rápido de una sola articulación se inicia por la contracción de un músculo agonista y se termina por una contracción temporalmente apropiadamente del antagonista.
- La contracción del antagonista comienza temprano en el movimiento, mucho antes de que haya habido tiempo para que la retroalimentación sensorial llegue al cerebro y, por lo tanto, debe ser programada como parte del movimiento.

El fracaso de la compensación por torques* de interacción puede dar cuenta de la ataxia cerebelosa



*El **torque** es la fuerza aplicada en una palanca que hace rotar alguna cosa.

El cerebro cerebelo

- El Cerebro cerebelo participa en la Planificación del Movimiento
- Es parte de un circuito interno de alto nivel de retroalimentación que planifica los movimientos y regula los programas motores
- Las lesiones del Cerebro cerebelo trastornan la Planificación motora y prolongan el tiempo de reacción
- El Cerebro cerebelo parece tener funciones cognitivas no relacionadas con el Control Motor

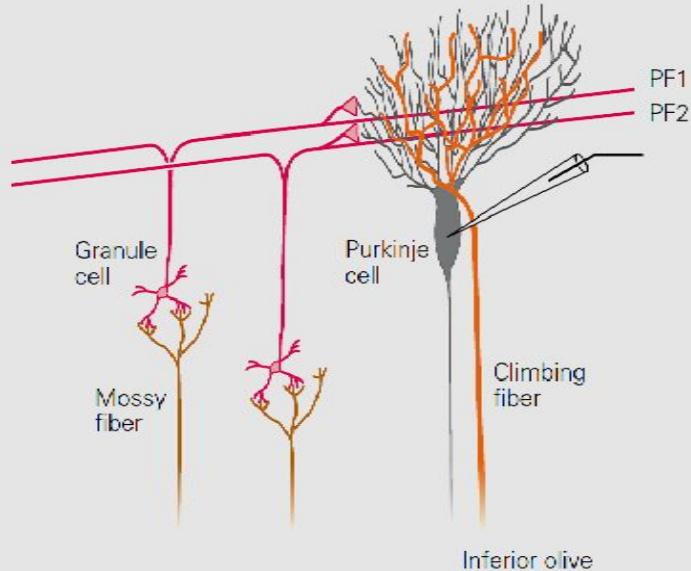
- El núcleo dentado parece ser particularmente importante en el procesamiento de la información sensorial para tareas que requieren juicios espaciales y temporales complejos, que son esenciales para las acciones motoras complejas y secuencias de movimientos.

Modelo de corrección de error del cerebelo

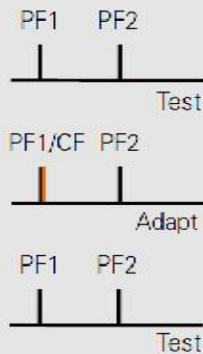
- Sobre la base de la modelización matemática de la función cerebelosa y los rasgos más llamativos del microcircuito cerebeloso descrito anteriormente David Marr y James Albus sugirieron de forma independiente a principios de 1970 que el cerebelo podría estar involucrado en el aprendizaje de las habilidades motoras. Junto con Masao Ito, propusieron que la entrada de la fibra trepadora a las neuronas de Purkinje modifica la respuesta de las neuronas a las entradas de las fibras musgosas y lo hace por un período prolongado de tiempo.

La depresión a largo plazo de la entrada sináptica de las fibras paralelas a las células de Purkinje es un mecanismo plausible para el aprendizaje del cerebelo.

A



Training

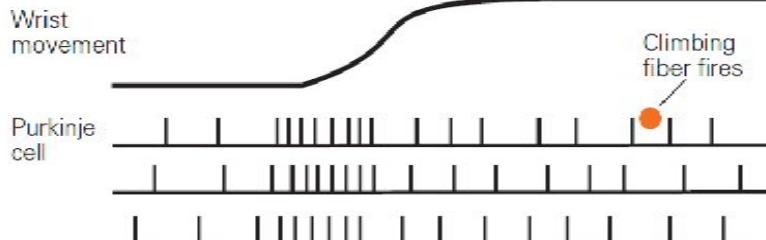


Parallel fiber EPSPs recorded in Purkinje cell

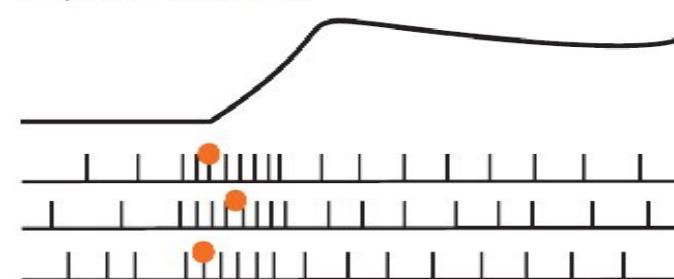


B

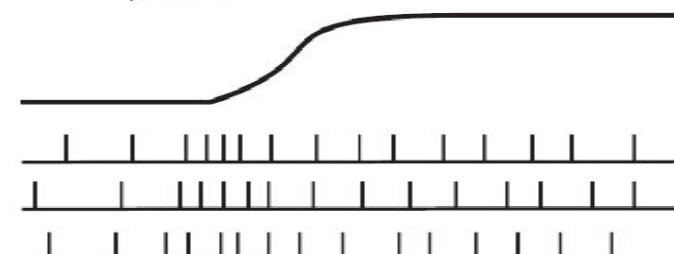
Accurate movement prior to loading



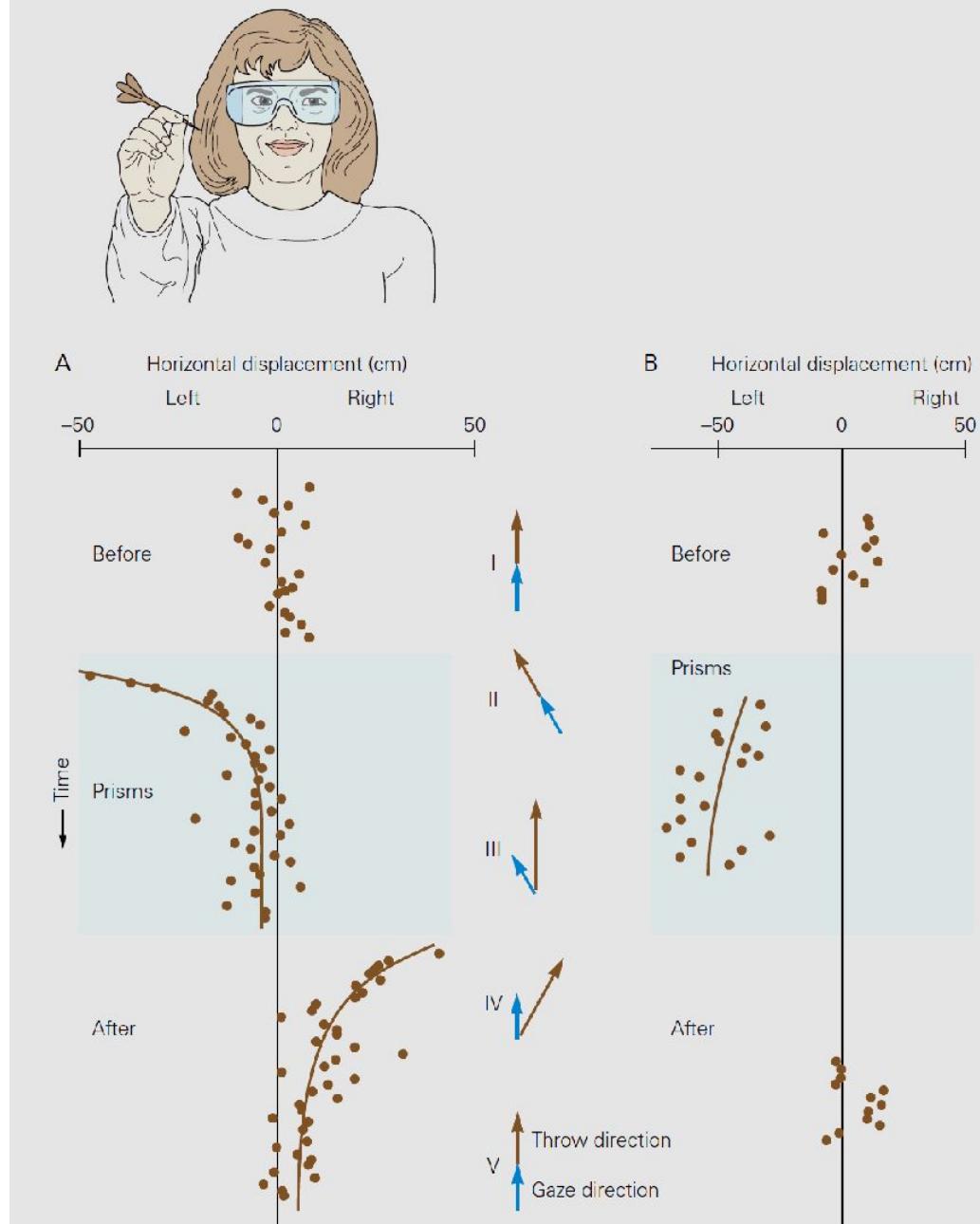
Adaptation to novel load



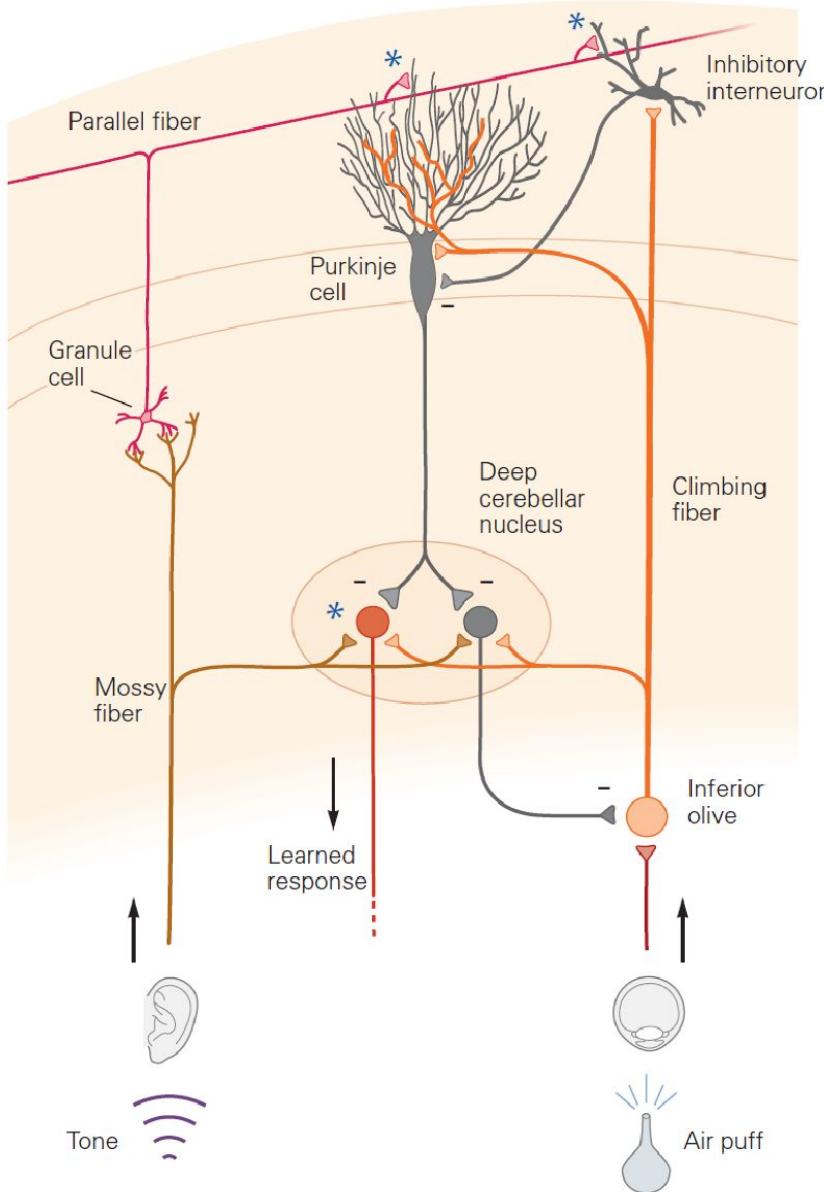
After adaptation



El cerebelo participa en el aprendizaje motor

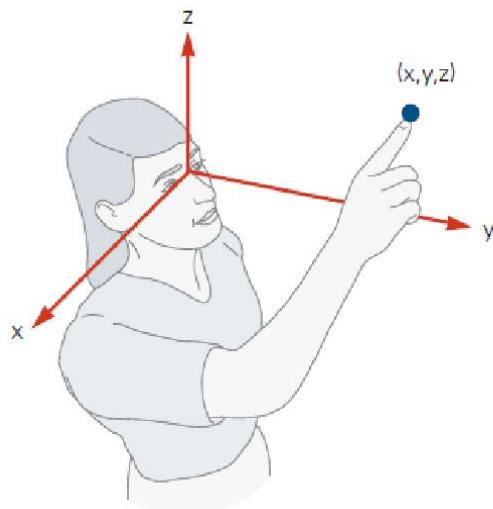


El aprendizaje puede ocurrir tanto en la corteza cerebelosa como en los núcleos profundos

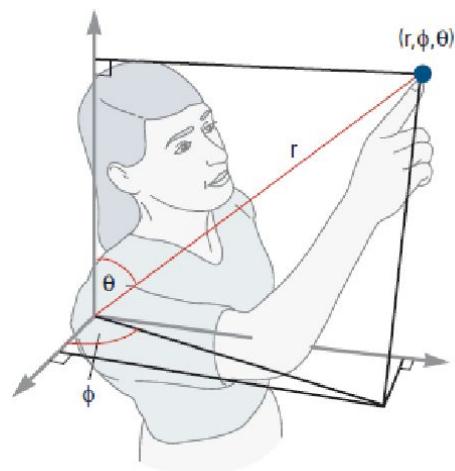


FIN

A Cartesian coordinates



B Spherical coordinates



C Joint angle coordinates

