



Electrical Stimulation

(Electrotherapy)

การใช้กระแสไฟฟ้าในเชิงกายภาพบำบัด



1. **Electrotherapy** คือ การใช้กระแสไฟฟ้าในการบำบัดรักษาโรค
2. **Electrodiagnosis** คือ การใช้กระแสไฟฟ้าในการกระตุ้นเพื่อการวินิจฉัยโรค โดยการแปลผลจากการตอบสนองของเส้นประสาทและกล้ามเนื้อ
3. **Electromyography (EMG)** คือ เป็นการบันทึกการตอบสนองที่ได้จากการทำงานของประสาทยนต์ (**Motor unit**) ออกมาในรูปของกระแสไฟฟ้า

ไฟฟ้าบำบัด (Electrotherapy)



การกระตุ้นด้วยไฟฟ้าจึงทำให้เกิด **Action potential** ในเส้นประสาทและกล้ามเนื้อเหมือนการทำงานตามปกติของร่างกาย จึงนำไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ในทางคลินิกได้หลายกรณี [5]

ไฟฟ้าบำบัดแบ่งออกเป็น 5 ประเภทคือ

1. การกระตุ้นกล้ามเนื้อที่มีประสาทมาเลี้ยงด้วยไฟฟ้า
2. การกระตุ้นกล้ามเนื้อที่ขาดประสาทมาเลี้ยงด้วยไฟฟ้า
3. การกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อซ่อมแซมเนื้อเยื่อ
4. การกระตุ้นประสาทกล้ามเนื้อด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ทำหน้าที่ได้
5. การรักษาความเจ็บปวดด้วยไฟฟ้า

ผลของไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้น (1)



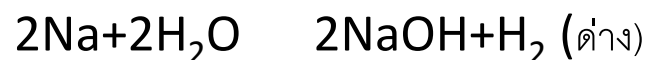
● ผลทางชีววิทยาของการกระตุ้นด้วยไฟฟ้า

1. ผลทางความร้อนไฟฟ้า

การเคลื่อนไหวของประจุในตัวกลางทำให้มีการสั่นสะเทือนของประจุไฟฟ้า การสั่นสะเทือนที่รวมกับแรงเสียดทานจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นอยู่กับ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ อิมพีแดนซ์ของผิวหนังและระยะเวลาที่ใช้ในการรักษา ถ้าใช้การกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง อิมพีแดนซ์ของผิวหนังจะมีค่ามาก จึงต้องลดกระแสไฟฟ้าลงมา และเวลาที่ใช้ในการรักษาให้น้อยที่สุด แต่ถ้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ อิมพีแดนซ์ของผิวหนังจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น

2. ผลทางเคมีไฟฟ้า

มีการใช้เครื่องกระตุ้นที่ปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงทำให้มีการแตกตัวของไฮเดียมและคลอไรด์เกิดสารเคมีใหม่ในเนื้อเยื่อที่อยู่ใต้อิเล็กโทรด ดังสมการ



ผลของไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้น (2)



2. ผลทางเคมีไฟฟ้า (ต่อ)

ถ้าปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งเกิดจากกระแสไฟตรงนั้นไม่มากนักร่างกายจะตอบสนองโดยการเพิ่ม การไหลของเลือดเข้าไปที่บริเวณนั้นเพื่อปรับค่า **pH** ของเนื้อเยื่อให้กลับเป็นปกติ แต่ถ้าปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นมากเกินไปจะทำให้ผิวหนังบริเวณนั้นเกิดไหม้พองขึ้น

3. ผลทางฟิสิกส์ไฟฟ้า

ผลทางฟิสิกส์ไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนโดยประจุไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นอิเล็กโตรไลต์หรือเป็นโมเลกุลที่ไม่แตกตัว เช่น โปรตีนหรือไลโปโปรตีน (**Lipoprotein**) ผลทางฟิสิกส์ไฟฟ้านั้นอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ผลของไฟฟ้าพลังงานจลน์ (**Electrokinetic effect**) เหตุการณ์ทางสรีรวิทยาที่เกิดเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนต่างๆ ได้แก่ การกระตุ้นเส้นใยประสาทเมื่อมีประจุไฟฟ้าไหลเฉียด และไปดึงดูดไอออนที่มากเพียงพอซึ่งเคลื่อนที่ข้ามเยื่อเซลล์ ผลโดยตรงต่อเซลล์ดังกล่าวอาจทำให้เกิดการตอบสนองทางอ้อมหลายอย่าง เช่น การหดตัวของกล้ามเนื้อ การเร่งกลไกการลดความเจ็บปวดภายในร่างกาย และการตอบสนองของหลอดเลือดต่างๆ

การกระตุ้นกล้ามเนื้อที่มีประสาทมาเลี้ยงด้วยไฟฟ้า



Neuromuscular electrical stimulators (NMES)

ใช้กระแสไฟฟ้ากระตุ้นกล้ามเนื้อที่มีเส้นประสาทมาเลี้ยงปกติ (Innervated muscle) เพื่อคงไว้ซึ่งการทำงานของกล้ามเนื้อ (restore muscle function) ได้แก่ การเพิ่มความแข็งแรงของกล้ามเนื้อ (muscle strengthening) , การลดการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อ (spasm reduction) , การชะลอหรือป้องกันการฝ่อลีบของกล้ามเนื้ออันเนื่องมาจากการไม่ได้ใช้งาน (disuse atrophy prevention) และการเรียนรู้การทำงานของกล้ามเนื้อ (muscle re-education)

- นิยมใช้รูปคลื่นทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ที่เป็น Rectangular wave (Square wave) ที่ความถี่ 10-100 Hz กระแส 9-25 mA ความกว้างพัลส์อยู่ระหว่าง 0.2-0.5 ms (0.3 ms)
- ความถี่ที่ใช้ที่ความถี่ 1-5 Hz จะทำให้กล้ามเนื้อหดตัวแบบ หดตัวแต่ละครั้งแยกกัน (Twitch contractions) ทำให้กล้ามเนื้อมีความตึงเล็กน้อย
- ความถี่ต่ำถูกใช้เพื่อบอกตำแหน่งประสาททนต์
- ความถี่ 10-20 Hz ทำให้เกิดการกระตุกของกล้ามเนื้อเรียกว่า incomplete tetanus
- ที่ความถี่ 30 Hz ทำให้กล้ามเนื้อหดตัวเกร็งแบบ complete tetanus ซึ่งทำให้กล้ามเนื้อหดตัวโดยไม่กระตุก

การกระตุ้นกล้ามเนื้อที่ขาดประสาทมาเลี้ยงด้วยไฟฟ้า



Electrical muscle stimulation (EMS)

เป็นการใช้เครื่องกระตุ้นไฟฟ้าในการรักษากล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยง (denervated muscle) เพื่อรักษาสภาพของกล้ามเนื้อ ชะลอการฝ่อลีบของกล้ามเนื้อ (muscle atrophy) หรือเพื่อให้เกิดการเรียนรู้ใหม่ (Re-education) ในกล้ามเนื้อที่ขาดเส้นประสาทมาเลี้ยงบางส่วน (partial denervated muscle) เพิ่มหรือคงสภาพช่วงการเคลื่อนไหวของข้อต่อ ลดการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อ ในภาวะกล้ามเนื้อแข็งเกร็ง หลักการคือใช้ไฟฟ้ากระตุ้นกล้ามเนื้อที่มีเส้นประสาทมาเลี้ยง บริเวณประสาทยนต์ของกล้ามเนื้อ

การกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อซ่อมแซมเนื้อเยื่อ (1)



Electrical stimulation for tissue repaired (ESTR)

○ การกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากับการไหลเวียนเลือดรอบนอก

1. การกระตุ้นการทำงานของประสาทอัตโนมัติ (Autonomic nervous system)
2. การกระตุ้นที่กล้ามเนื้อเพื่อให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อที่ทำหน้าที่คล้ายเครื่องปั้มน้ำ

○ การกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อให้แผลหายเร็วขึ้น

การรักษาด้วยไฟฟ้าสามารถช่วยเร่งการหายของแผลเรื้อรังได้ โดยที่ขั้วลบจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและทำให้แผลอ่อนนุ่ม ส่วนขั้วบวกจะเร่งการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อ โดยเพิ่มการไหลเวียนเลือดและลดการบวม นิยมใช้รูปคลื่น **Square wave** ทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตรความถี่ **20-120 Hz** กระแส **0.3-25 mA** ความกว้างพัลส์อยู่ระหว่าง **0.01-0.3 ms**

การกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อซ่อมแซมเนื้อเยื่อ (2)



- การกระตุ้นด้วยไฟฟ้าเพื่อเร่งให้กระดูกติด

ภาวะที่กระดูกไม่ติดหรือภาวะกระดูกติดยากเกิดจากภาวะเครียดมีผลต่อการเจริญเติบโตของกระดูก ใช้กระแสไฟตรงชั่วลบบริมาณ $5-20 \mu A$ กระตุ้นผ่านอิเล็กโทรดที่ฝังในกระดูก

1. **Semi-invasive system** วิธีนี้อิเล็กโทรดทั้งสองจะถูกฝังไว้ที่เหนือและต่ำกว่าตำแหน่งที่กระดูกไม่ติด หรือฝังเฉพาะอิเล็กโทรดชั่วลบบริมาณไว้ที่ตำแหน่งที่ต้องการรักษา ขณะที่ขั้วบวกและเครื่องกระตุ้นอยู่ข้างนอกตัวผู้ป่วย
2. **Totally implantable (Invasive)** วิธีนี้อิเล็กโทรดและเครื่องกระตุ้นถูกฝังไว้ในตัวผู้ป่วย
3. **Noninvasive** วิธีนี้ใช้ขดลวดที่เหนียวนำไฟฟ้า เพื่อส่งคลื่นไฟฟ้าหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าไปกระตุ้นกระดูก

- การกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากับการลดการบวม

การใช้ไฟฟ้ากระตุ้นกล้ามเนื้อให้มีการหดตัวทำให้มีการเพิ่มการไหลเวียนของเลือดดำและน้ำเหลืองได้

การกระตุ้นประสาทกล้ามเนื้อด้วยไฟฟ้าเพื่อให้ทำหน้าที่ได้



Functional Electrical Stimulator (FES)

1. FES กับผู้ป่วยทางระบบประสาท (Vodovnik, 1981)

- สนับสนุนและส่งเสริมการฟื้นตัวอย่างต่อเนื่องในหน้าที่ของส่วนประสาทยนต์ที่เสียไป
- การพัฒนาหน้าที่ด้านประสาทยนต์ในเด็กที่เป็นอัมพาตเนื่องจากความบกพร่องของสมอง
- ทำให้กลไกของประสาทยนต์ของรีเฟล็กซ์พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการทำให้มีการเคลื่อนไหวที่เป็นจังหวะ
- ทำหน้าที่แทนประสาทยนต์ที่ขาดหายไปจากผลของรอยโรคที่ระบบประสาทส่วนกลาง
- การป้องกันหรือการแก้ไขความผิดปกติทางการเคลื่อนไหวเนื่องจากการควบคุมท่าทางที่ไม่มีประสิทธิภาพ

2. การทำหน้าที่เป็นเครื่องช่วยพยุง (Orthotic device) ของ FES

คำว่า **Orthotic** หมายถึง เครื่องใช้ภายนอกเพื่อพยุงหรือส่งเสริมหน้าที่ของส่วนร่างกายให้ทำงานได้ดีขึ้นใช้ในการรักษาอาการของผู้ป่วยอัมพาตครึ่งซีก ผู้ป่วยหลังคด และผู้ป่วยหัวไหล่หลุด

การรักษาความเจ็บปวดด้วยไฟฟ้า



- เทคนิคการใช้ไฟฟ้ากระตุ้นเส้นประสาทผ่านผิวหนัง (Transcutaneous electrical nerve stimulation, TENS)

เพื่อที่จะบรรเทาหรือรักษาความเจ็บปวด การรักษาความเจ็บปวดโดยการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าความถี่สูง

O ภาวะเจ็บปวดเฉียบพลัน เช่น ความเจ็บปวดที่เกิดจากแผลผ่าตัด อาการปวดบริเวณช่องปากและใบหน้า ปวดฟัน

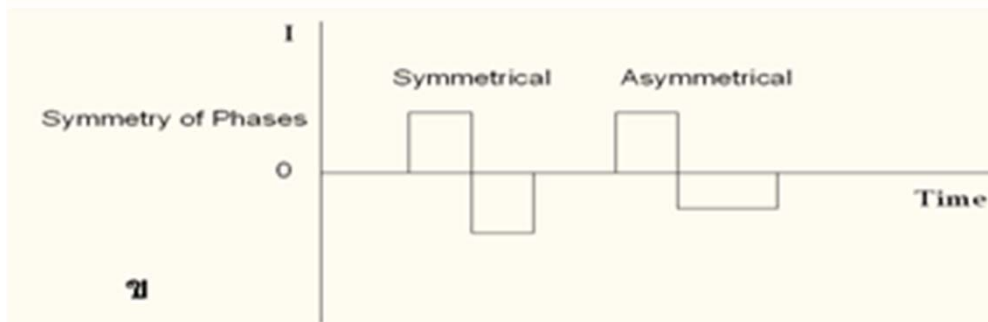
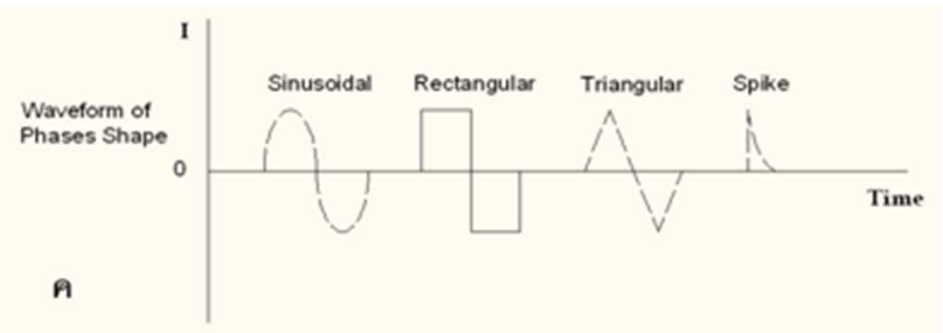
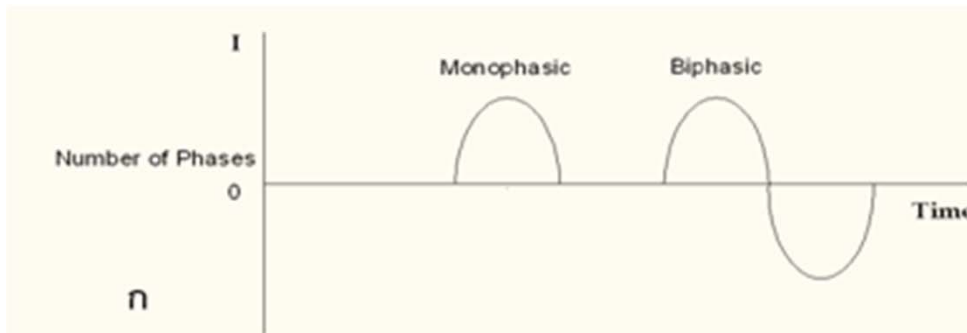
O ภาวะความเจ็บปวดเรื้อรัง เช่น ภาวะปวดหลังเรื้อรัง ภาวะปวดจากข้ออักเสบ

การรักษาการเจ็บปวดด้วยไฟฟ้า นิยมใช้รูปคลื่น **Square wave** แบบสมมาตร ที่ความถี่ **1-150 Hz** กระแส **0-60 mA** ช่วงเวลาของพัลส์อยู่ระหว่าง **0.04-0.30 ms**

Waveform



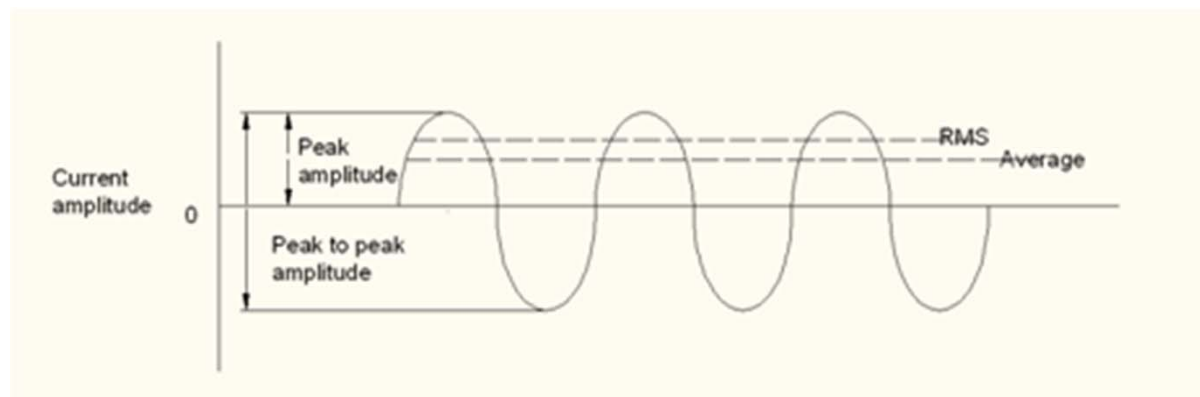
ในการกระตุ้นกล้ามเนื้อในคนปกติ พบว่าลักษณะของกระแสที่มักให้เกิดความรู้สึกสบายขณะกระตุ้นควรเป็นแบบ **biphasic waveform** โดยเฉพาะถ้ากระตุ้นกล้ามเนื้อขนาดใหญ่ควรใช้ **symmetrical biphasic wave form** จะให้ความรู้สึกที่สบายกว่า แต่ทั้งนี้ต้องปรับขึ้นอยู่กับความรู้สึกของผู้ป่วยแต่ละรายมากกว่า



Amplitude



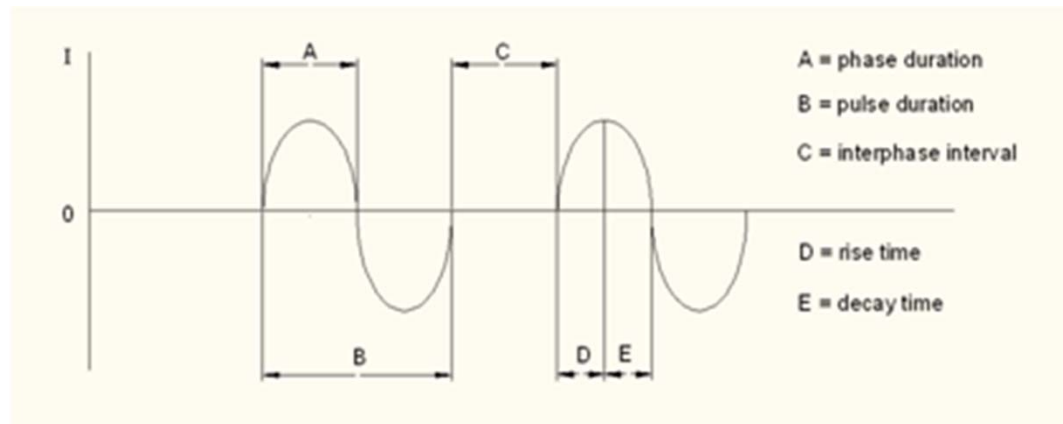
ความเข้มของกระแสที่กระตุ้น (**current amplitude** หรือ **intensity**) เป้าหมาย คือ ระดับความเข้มที่เหมาะสม ที่ทำให้เกิดการตอบสนองของกล้ามเนื้อ โดยให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อในระดับที่ต้องการตามวัตถุประสงค์ของการรักษานั้น ๆ ผู้ป่วยอาจจะต้องใช้ระยะเวลา 1-2 ครั้งของการรักษา กว่าที่จะสามารถเพิ่มความเข้มได้ถึงระดับดังกล่าว



Pulse rate , Frequency



ความถี่ของกระแสไฟที่ให้ มีหน่วยเป็น **pulse per second (pps)** จะเป็นตัวกำหนดชนิดของการหดตัวของกล้ามเนื้อ เช่น ถ้าให้กระแสไฟที่มีความถี่ 1 pps (Hz) จะได้การหดตัวเป็นแบบ **single twitch** แต่ถ้าเพิ่มความถี่อยู่ในช่วง 20-30 Hz จะได้การหดตัวเป็นแบบ **tetanic contraction** เมื่อความถี่สูงขึ้นกว่านี้ ก็จะได้ **tetanic contraction** ที่ได้แรงในการหดตัวมากขึ้นอย่างไรก็ตามพบว่าถ้าความถี่มีค่าเกิน 80 Hz ความแรงที่ได้จากการหดตัวของกล้ามเนื้อจะเพิ่มไม่มากไปกว่าเดิม และแน่นอน เมื่อเพิ่มความถี่ก็จะมีผลเพิ่มภาวะการล้า (**fatigue**) ของกล้ามเนื้อได้มากขึ้น



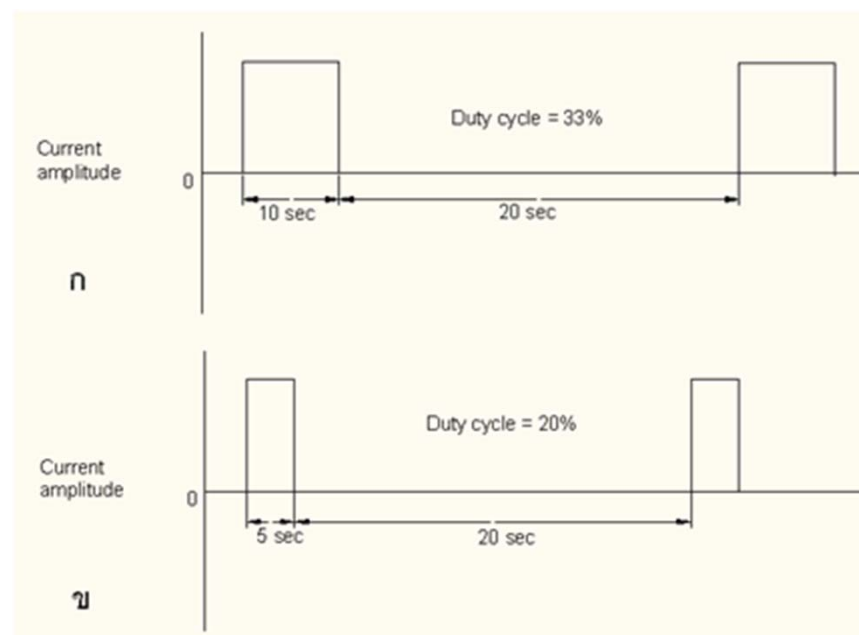
Duty cycle



เป็นอีกค่าหนึ่งที่มีผลต่อการล้าของกล้ามเนื้อ ค่า **duty cycle** มีค่าเป็น

$$\text{Duty Cycle} = \frac{\text{on time}}{\text{on time} + \text{off time}} \times 100 \%$$

ค่า **off time** เป็นระยะที่ไม่เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อ คือช่วงกล้ามเนื้อพัก ดังนั้น ถ้ากล้ามเนื้อมีระยะเวลาในการพักน้อย จะเกิดการล้าเร็ว โดยมากค่า **off time** ที่เหมาะสมคือ อยู่ในอัตราส่วน **on time : off time** ที่ 1:3 หรือ 1:5 หนังสือบางเล่มให้อัตราส่วนที่ 1:6 ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวจัดเป็นอัตราส่วนที่ไม่ทำให้เกิดการล้าแก่กล้ามเนื้อขณะกระตุ้น โดยในการปฏิบัติมักจะตั้งเวลาของ **on time** อยู่ในช่วง 2-10 วินาที



ลักษณะการวางขั้วกระตุ้น (electrode configuration)



หลักในการวางขั้วกระตุ้นนั้น ต้องคำนึงถึงผลของการกระตุ้น นั่นคือ เป็นการวางขั้วที่ให้กระแสไฟลงสู่กล้ามเนื้อทั้งมัดได้อย่างทั่วถึง และเกิดความสบายแก่ผู้ป่วยเช่น ในกรณีที่ต้องการกระตุ้นกล้ามเนื้อ **quadriceps femoris** พบว่าเมื่อวางขั้วแบบ **bipolar technique** โดยให้ขั้วกระตุ้นวางขนานไปกับเส้นลายกล้ามเนื้อ คือขั้วหนึ่ง วางบริเวณ **femoral triangle** อีกขั้วหนึ่งวางที่ **distal anteromedial thigh** การวางขั้วลักษณะเช่นนี้ จะให้แรงในการหดตัวของกล้ามเนื้อมากกว่าขณะกระตุ้น เมื่อเทียบกับการวางขั้วกระตุ้นในแนวขวางลายกล้ามเนื้อ ยิ่งถ้ากระตุ้นกล้ามเนื้อที่มีขนาดใหญ่ ควรใช้ขั้วกระตุ้น 2 **channel** หรือ 4 ขั้วกระตุ้น ซึ่งการใช้ขั้วกระตุ้นเพิ่มขึ้น จะให้ประสิทธิภาพในการกระตุ้น โดยให้แรงในการหดตัวมากขึ้น และยังผลให้เกิดความสบายขณะกระตุ้นมากกว่า เพราะความเข้มข้นในแต่ละ **channel** จะน้อยลง แต่มีการกระจายของกระแสไฟได้มากขึ้น

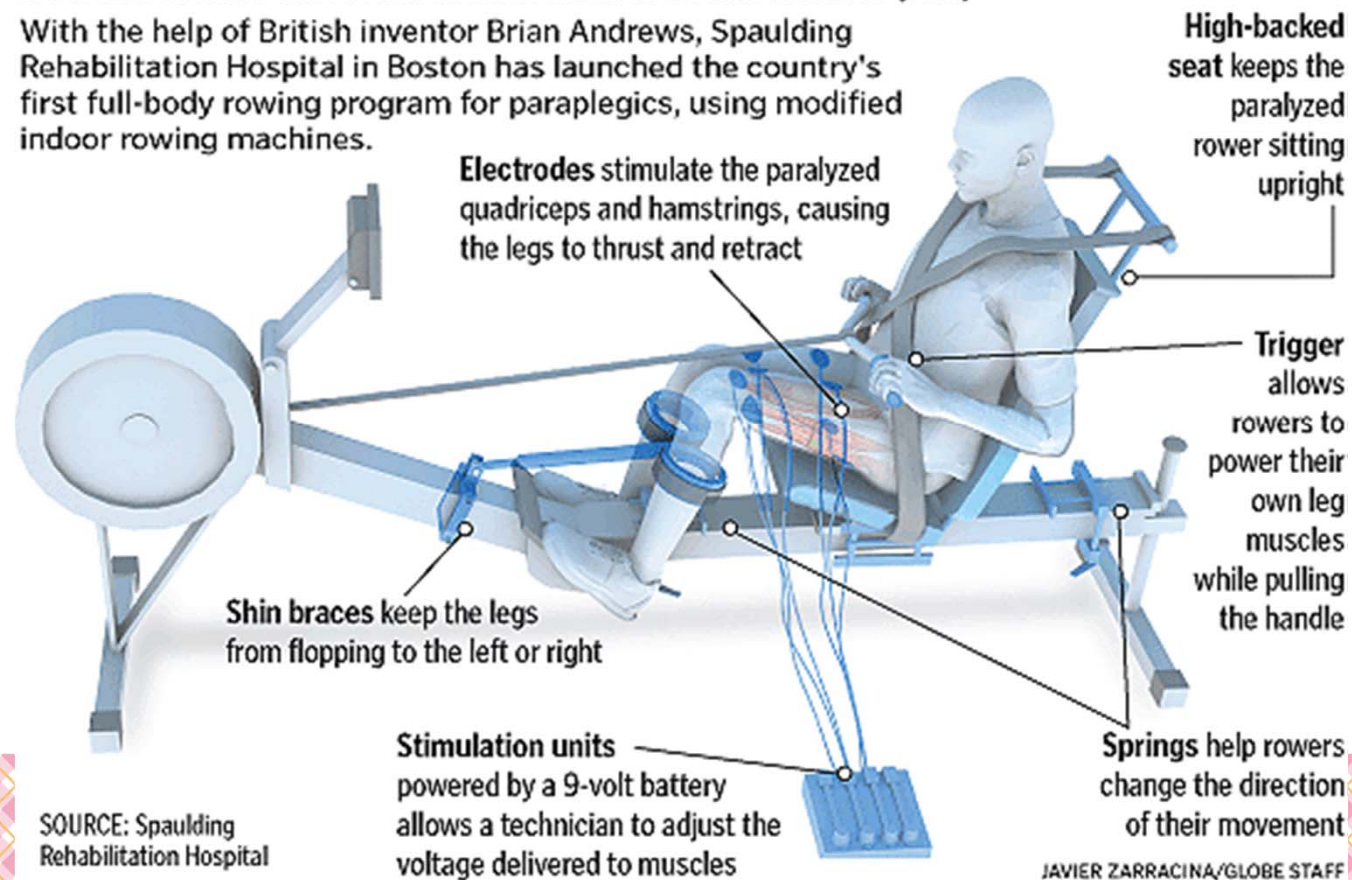
Functional electrical stimulators for restoration of limb function



Functional electrical stimulation (FES) is “the application of electrical current to excitable tissue to supplement or replace function that is lost in neurologically impaired individuals” (Peckam & Knutson, 2005).

ROWING WITH FUNCTIONAL ELECTRICAL STIMULATION (FES)

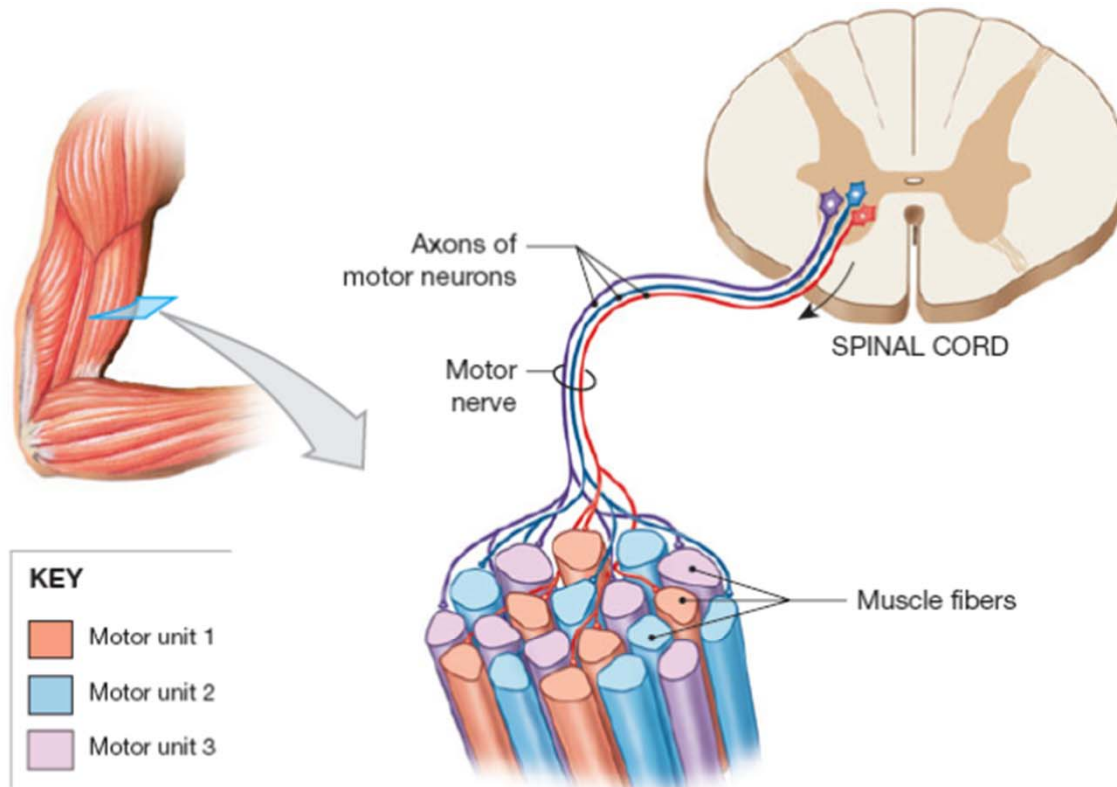
With the help of British inventor Brian Andrews, Spaulding Rehabilitation Hospital in Boston has launched the country's first full-body rowing program for paraplegics, using modified indoor rowing machines.



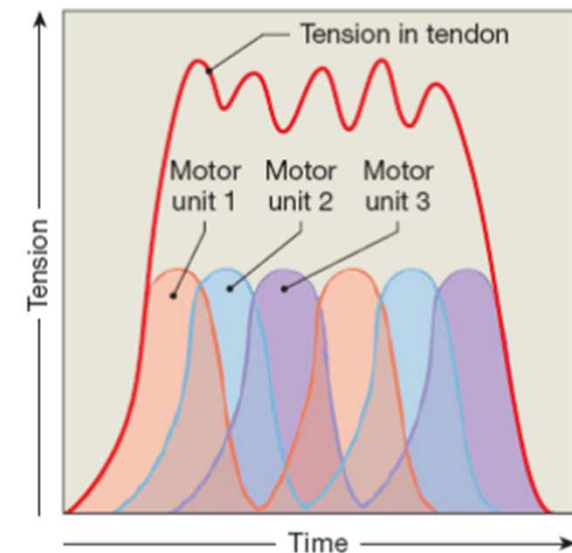
SOURCE: Spaulding
Rehabilitation Hospital

JAVIER ZARRACINA/GLOBE STAFF

Motor neurons

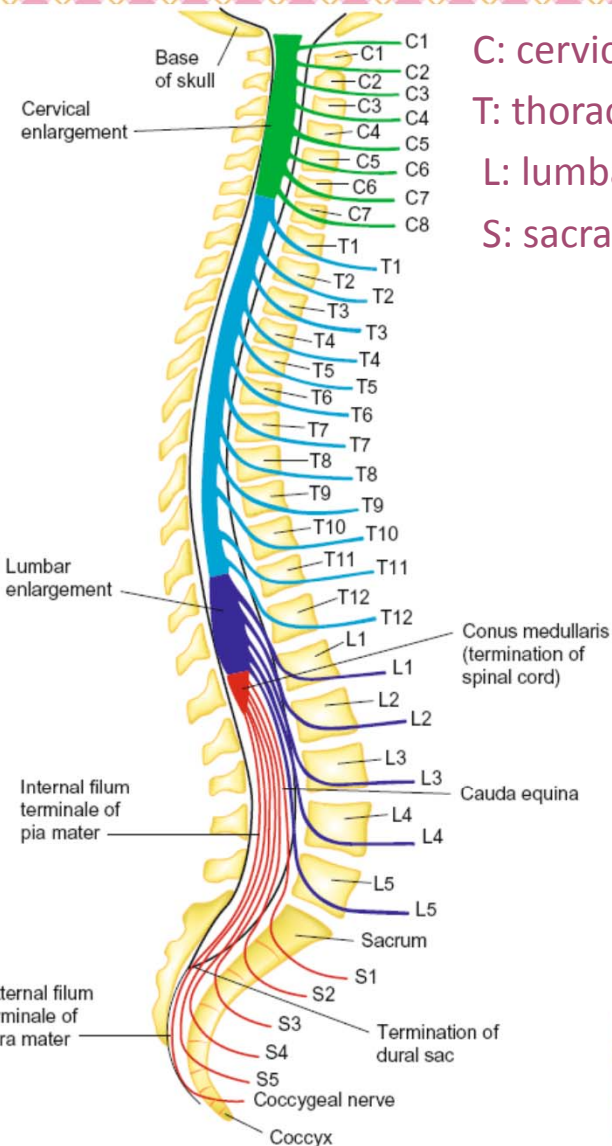


a Muscle fibers of different motor units are intermingled, so the forces applied to the tendon remain roughly balanced regardless of which motor units are stimulated.



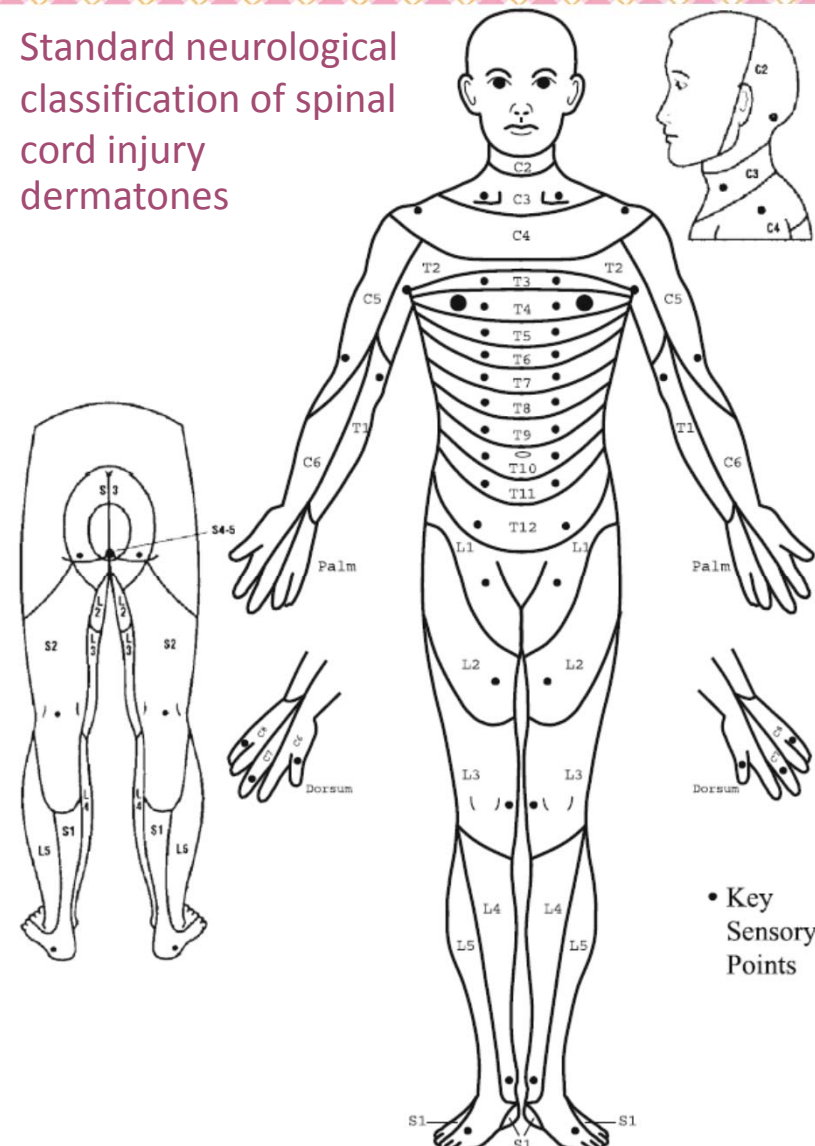
b The tension applied to the tendon remains relatively constant, even though individual motor units cycle between contraction and relaxation.

Spinal cord and spinal roots



C: cervical
T: thoracic
L: lumbar
S: sacral

Standard neurological
classification of spinal
cord injury
dermatomes

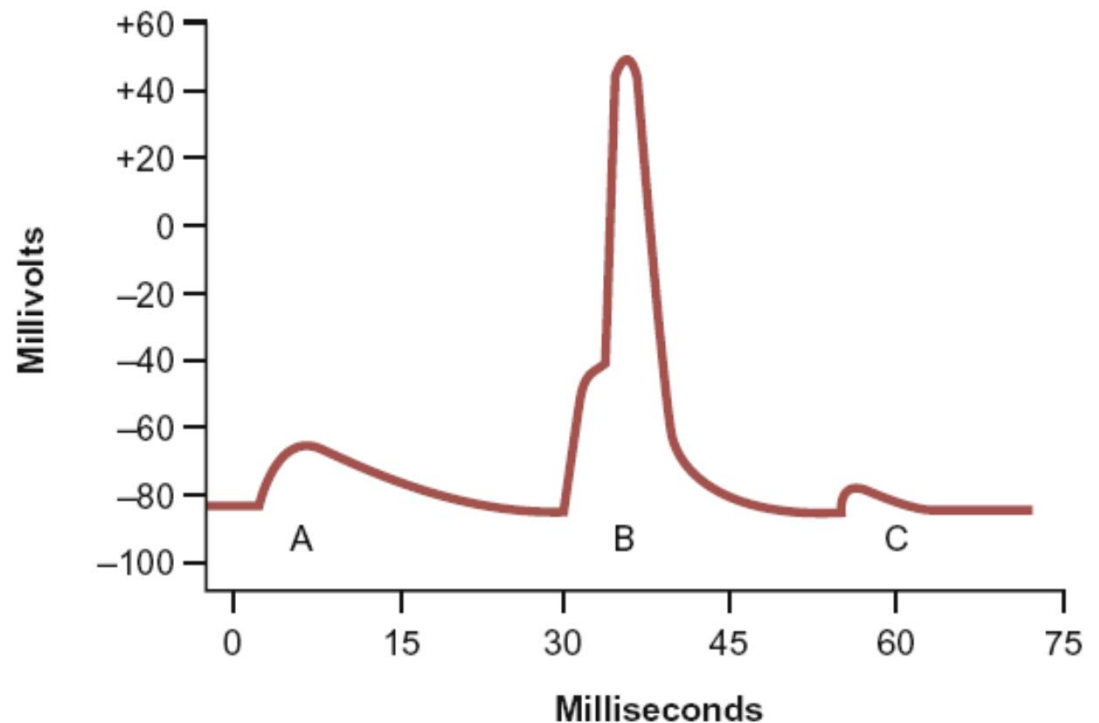


• Key
Sensory
Points

End plate potentials



End plate potentials, in mV. A: Weakened end plate potential recorded in a curarized muscle, too weak to elicit an action potential. B: Normal end plate potential eliciting a muscle action potential. C: Weakened end plate potential caused by botulinum toxin that decreases end plate release of acetylcholine, again too weak to elicit a muscle action potential [Reproduced by permission from Guyton & Hall (2006)].



Example devices (1)

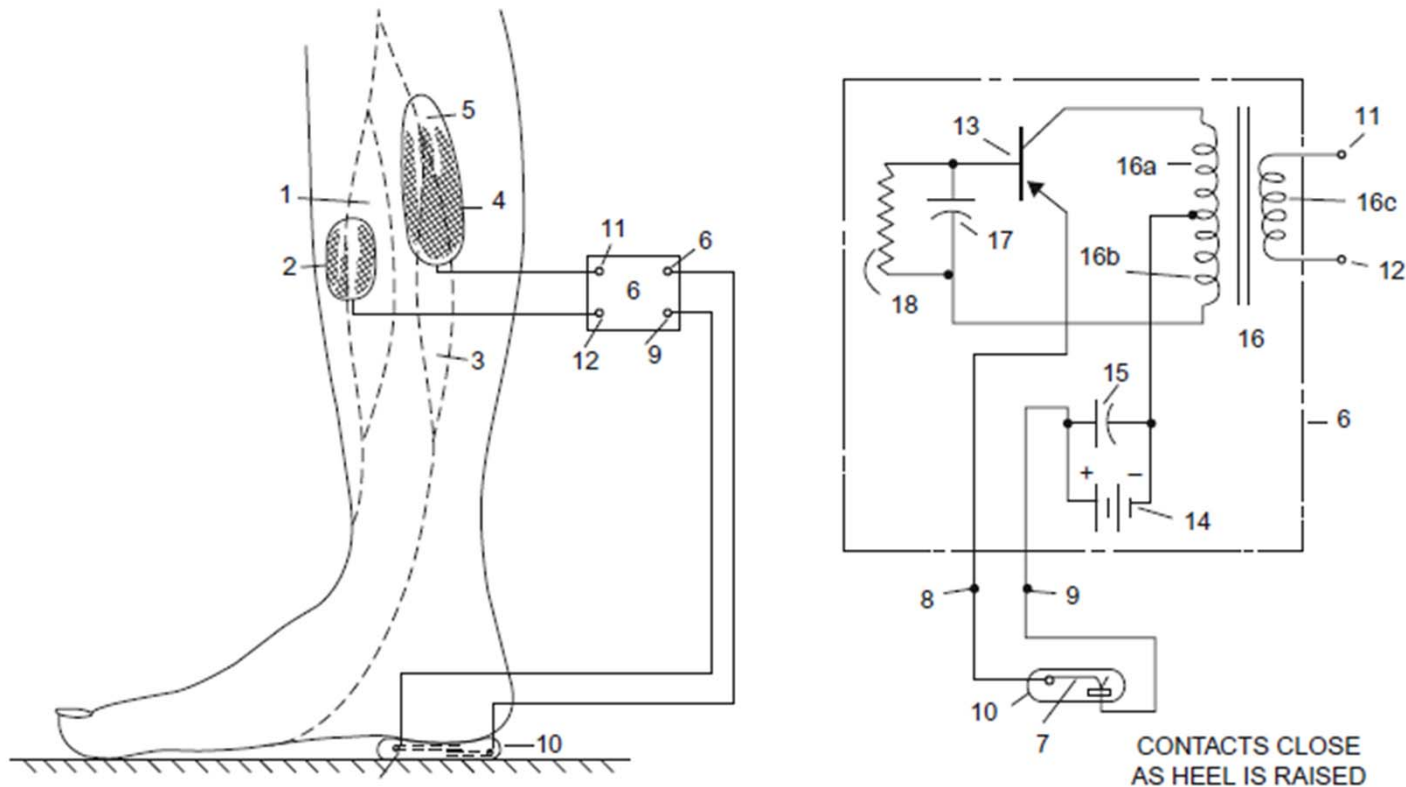


FIGURE 16.11 Liberson's method of muscular stimulation in human beings to aid in walking. [Taken from US 3,344,792; Offner & Liberson (1967)].

Example devices (2)



(A)



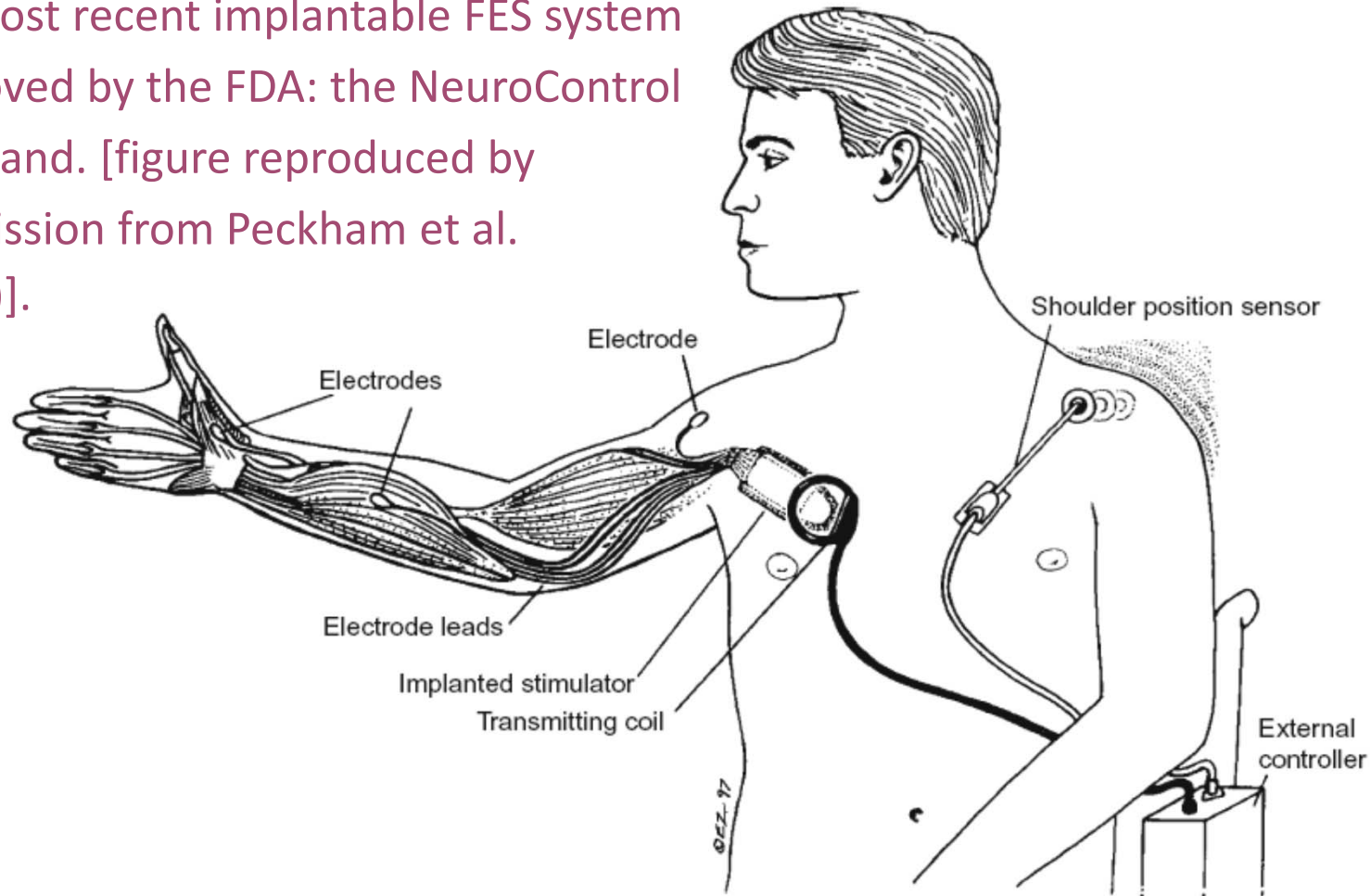
(B)

The NESS H200 (A) and L300 (B) stimulate hand and leg muscles with surface electrodes (Bioness, Inc., Valencia, California).

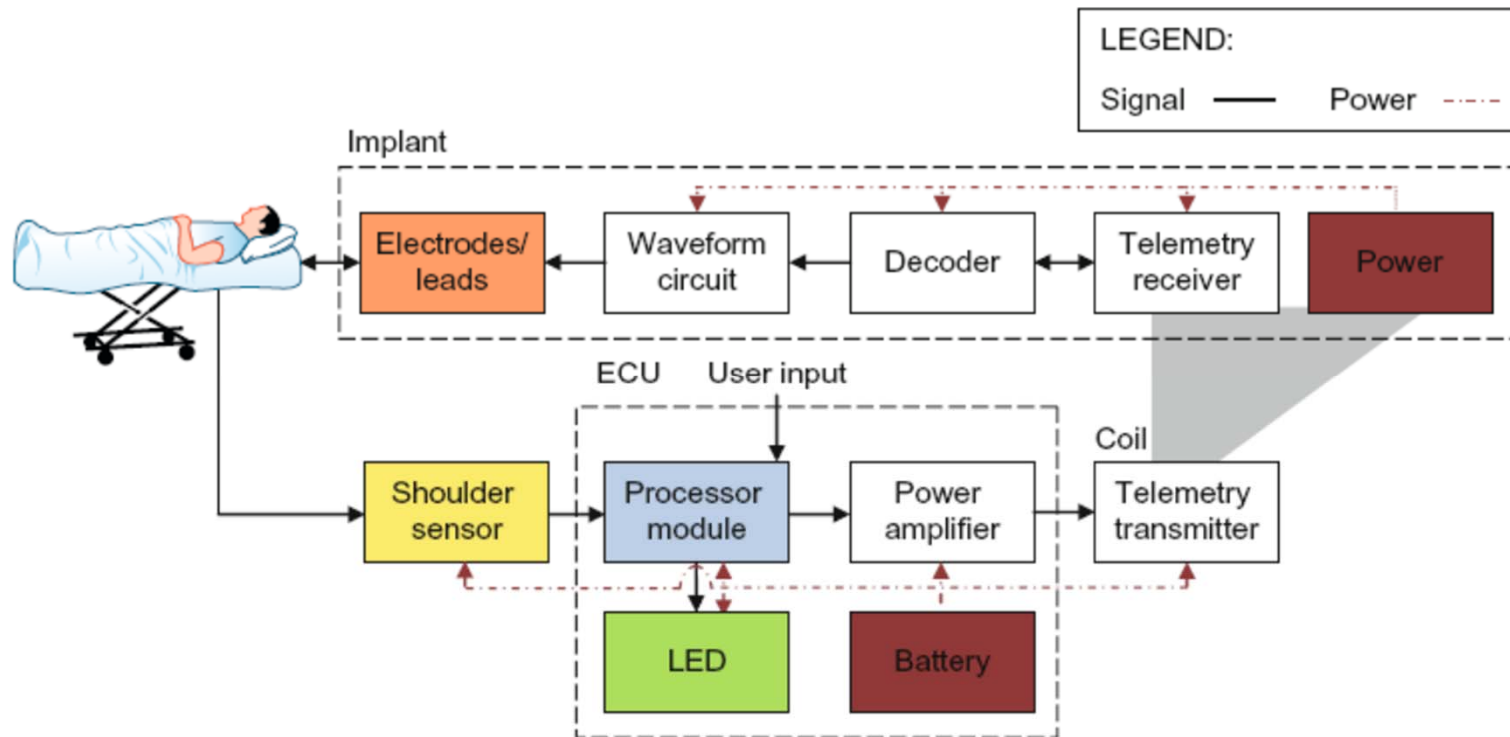
Example devices (3)



The most recent implantable FES system approved by the FDA: the NeuroControl Freehand. [figure reproduced by permission from Peckham et al. (2001)].



Example devices (4)



NeuroControl Freehand system diagram

References



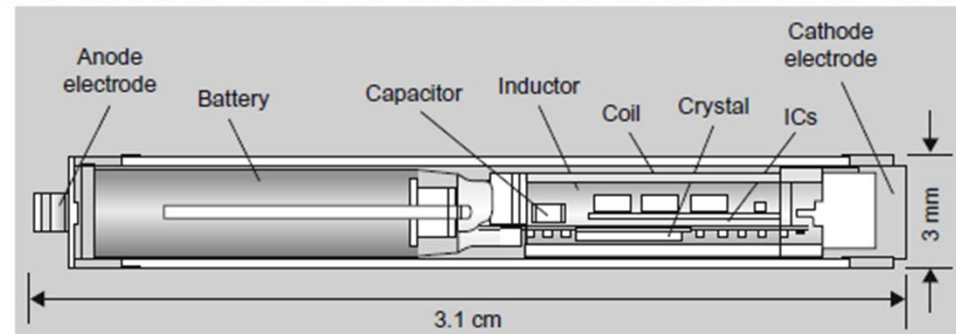
1. Fundamental of Anatomy and Physiology, Frederic H. Martini
2. Biomedical Instrumentation: Application and Design, John G. Webster
3. Medical Device Technologies: A Systems Based Overview Using Engineering Standards, Gail D. Baura
4. The Biomedical Engineering Handbook, Joseph D. Bronzino
5. กัญญา ปาละวิวัฒน์. การรักษาด้วยเครื่องไฟฟ้าทางกายภาพบำบัด. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์เดอะบุคส์, 2543.

Example devices (5)



Bion cross

section (A) and block diagram (B) [Reproduced by permission from Lee et al. (2009)].



The bion is a microstimulator that contains a transceiver for data and battery recharging, a goniometry sensor to detect relative motion of a nearby permanent magnet, an electrode anode, and an electrode cathode.

