

運動制御理論

理論群	中核概念(制御の原理)	主な研究者	大脳・脊髄関係の説明・方向性/コマンドの性質/フィードバックの扱い
Internal Model Theory	Forward/Inverse modelsによる予測と誤差補正	Kawato, Wolpert, Miall, Shadmehr	大脳・小脳が身体力学を内部に模倣し、脊髄を出力器として制御する。学習・誤差修正が可能・ 双向性(再帰的)/明示的コマンド μ を計算/誤差を上位に返す
Optimal Feedback Control	運動目標を達成するためのコスト最小化	Todorov & Jordan	大脳皮質と脊髄反射が一体化した“最適化システム”である。上位は「コスト関数」を設定し、末梢は自動的に適応する。 双向性(動的最適化)/コマンドは逐次修正される/状態推定と制御を統合
Dynamic Systems/Synergy Approach	運動は非線形力学系の自己組織化	Thelen, Kelso, Latash	大脳はパラメータ設定をし、脊髄ネットワークは自律的振る舞いを生み出す。システムはある安定状態(アトラクター)に落ちこむとする。環境条件やパラメータ(速度・力・感覚入力など)が変化すると、アトラクターが変わり、新しい運動パターンに「相転移」する。この「秩序の転換」は、脳が明示的に命令しなくとも、システム全体のダイナミクスによって自然に起こる
Active Inference/Predictive Coding	知覚・運動を自由エネルギー最小化で統一	Friston, Pezzulo, Adams	大脳は「予測誤差」を最小化し、運動はその結果である。脊髄は予測誤差を駆動する下位層である。 強いtop-down(予測)とbottom-up(誤差)の双向性/明示的コマンドを用いず、予測自体が行動を駆動/誤差伝播の精度調整が中心
Equilibrium-Point/Referent-Configuration Hypothesis* (Feldman-Latash)	伸張反射閾値 λ のシフトで運動を生む	Feldman, Latash	大脳は参照構成(referent configuration)を設定し、脊髄反射がそれを実現する。 フィードフォワードを不要にする。 局所的bottom-upの自己組織/運動コマンドではなく入シフト/フィードバックは反射的に統合

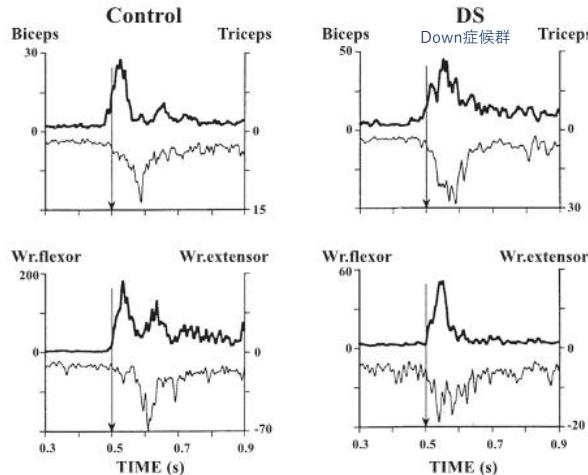
*身体システムの生理的制約を内包した制御の最下層

✓ Upper motor neuron-lower motor neuron に理はない

*William Richard Gowers (1845-1915)は、19世紀末に著作等で上位運動ニューロンという用語を用いた (ChatGpt)

1

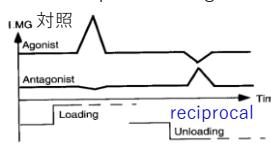
Latash ML, Singh T. Neurophysiological Basis od Motor Control. 3rd. 2024.



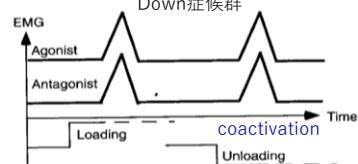
- 上腕を机上に置き、前腕・手を垂直に立てた椅子座位で、手関節を速く屈曲させる
- 健常者はtriphasic pattern (主動筋→拮抗筋→主動筋の再活動)をとる
*最初の主動筋放電は加速、拮抗筋放電は減速と位置決め、最後の主動筋の短いバーストは安定化に関わる
- Down症候群はcoactivation patternをとる

- Agonist-antagonist musclesのcoactivationは一般的である
* Agonist-antagonistの二分は過度な単純化であり実用性はない
- Spasticityは一側の伸筋・屈筋のactivation (DTR亢進, clonus) を起こし、過剰なcoactivationも起こす。Central pattern generatorsはcoactivationを起こさない。
- 小脳はcoactivationに関与し、四肢の非課題時の関節安定化に関与する。cerebellar ataxia ではexcessive agonist-antagonist coactivationが起こる。
- 基底核もcoactivationに関与する
- Coactivationはadaptive or maladaptive
- Synergyは正常運動・異常運動でも存在する
運動の神経制御が階層的構造を持ち、各階層において入力は出力に比べて低次元である→各階層は、システム全体として生成すべきものを指定する入力が与えられると、出力をどのように定義するかという表層的な冗長性問題に対処しなければならない→各レベルにおいて、この問題は唯一の最適解を見つけることではなく、課題解決能力を有する解の集合を促進する→全体的な出力が要求される値に近づくように、要素変数を共変させることによって達成される→synergy

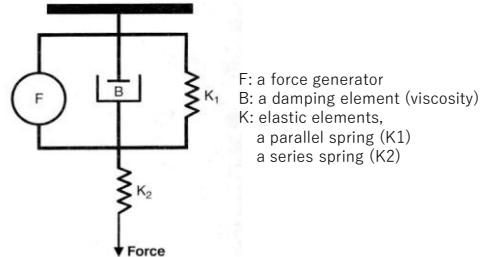
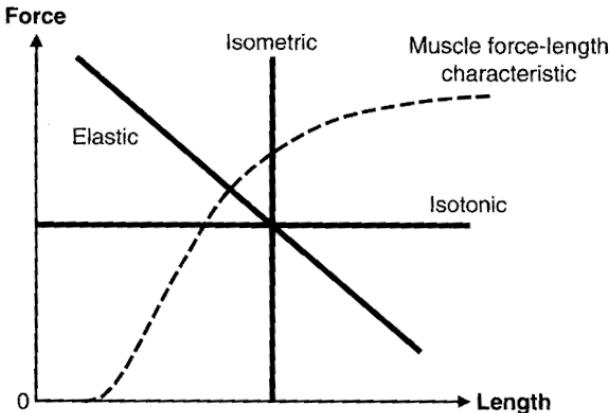
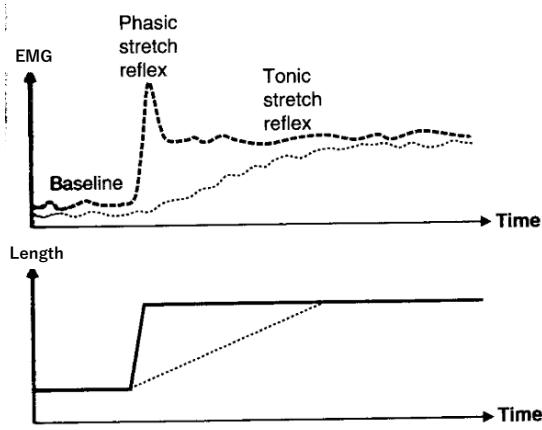
An unexpected change in external load



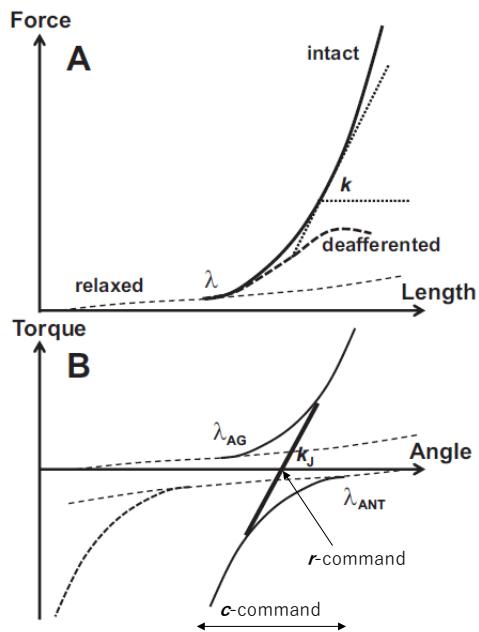
Down症候群



2

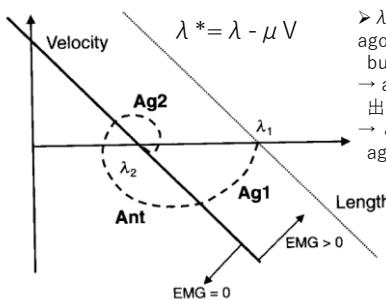


3



Equilibrium-Point Hypothesis (EPH)

- 脳は筋肉へのforce commandを直接出すのではなく、目標となる筋長・関節位置(=平衡点)を設定する。筋肉はバネ様特性(張力 - 長さ関係)を持つので、目標平衡点を変えると筋張力が自動的に変化し、関節は新しい平衡点に移動する。結果的に、複雑な運動は筋や関節の受動的特性と脊髄反射を含むループにより自己組織的に生じる
- *筋スレッショルド長(λ)という概念が鍵。脳が α 運動ニューロンの閾値(=筋紡錘からの伸張反射が出る長さ)を変化させると、筋の平衡点がずれて新しい位置に落ち着く。これにより外乱に対しても柔軟に適応できる(スプリングのように)
- 弛緩した筋はバネ様の抵抗(バネ定数 k)をしめす。反射のある筋では k は高くなり、力は急峻な線状に増加する
- 拮抗筋が非ゼロの共活性化を示す場合、関節全体の特性(黒太線)はcoactivationがない場合と比較して急峻になる。これは見かけの剛性 k の増加に対応する。主筋は正のトルク値を生じ、拮抗筋は負のトルク値を生じる
- 脳から r (reciprocal)-command と c (coactivation)-command あり



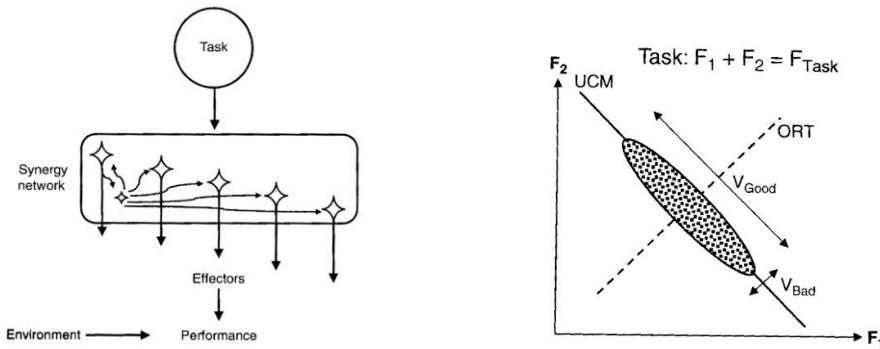
$\lambda_1 > \lambda_2$ が λ_2 に変わると triphasic patternが起こる
 agonistの収縮・短縮(負の速度)でfirst agonist burst (Ag1)は終息する
 \rightarrow antagonistの伸長でantagonist burst (Ant)が出現する
 \rightarrow これにより agonistが伸長されて、second agonist burst (Ag2)が起こる

4

2

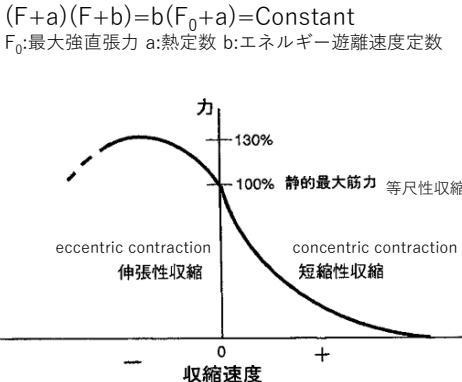
Synergy / Uncontrolled manifold (UCM) theory

- Posture-movement paradoxへの対応
 - 姿勢制御は安定性(stability)を最大化しようとする
 - 随意運動は姿勢の安定をあえて崩すことで始まる
- 多自由度の身体運動を synergy でまとめてることで、姿勢安定と運動生成を同時に達成する
- Uncontrolled Manifold (UCM)でparadoxを自由度の分離として解決する
 - 姿勢安定に必要な方向の変動 → 小さくおさえる stability
 - 運動に必要な方向の変動 → むしろ自由に解放する flexibility
 - good variability(V_{UCM} , 運動に必要な変動)と bad variability(V_{ORT} , 姿勢を乱す変動)の分離



5

Hillの式 阿江通良, 藤井範久, スポーツバイオメカニクス 20講, 2002.



- 短縮性収縮では、筋の収縮速度が小さいほど、出しうる力は大きくなる。筋の収縮速度が大きいと、出しうる力は小さくなる
- 速度ゼロは等尺性収縮
- 伸長性収縮では、ある程度大きい方が発揮される力は大きい。等尺性収縮の約30%大きい
- 手を上げるか、足を上方か側方に移せば、重心が上がり、移動には有利になる
- 慣性モーメントは胴体が大きく、四肢は小さい
→ 身体を小さくたためば、回転速度は増す

Anticipatory Postural Adjustments 予測的姿勢調整

- すばやい随意運動は姿勢外乱の原因となる
- 随意運動に先行して、その外乱を最小とするように、姿勢筋の活動が変化する
- Segmental reconfiguration/Counter-rotation strategy
セグメント配置の変更による補償、身体の一部を逆方向へ回して重心を戻す
- CoM shift/Counter-rotation strategy 質量の移動による重心操作
- Stepping strategy/Hip strategy/Counter-rotation 支持基底面からの逸脱時の補償
- Joint torque coordination
- Intersegmental dynamics
- Kinetic chain

上記概念の日本語英語

- カウンターアクティビティ：運動方向と反対側の筋収縮により逆モーメントを発生させ姿勢制御をする
- カウンターウェイ特：運動と反対側に質量を移動して姿勢制御をする
- カウンターバランス：身体のある部分が支持基底面から逸脱している場合、身体の他の部分が正反対の方向に移動してバランスを保つ

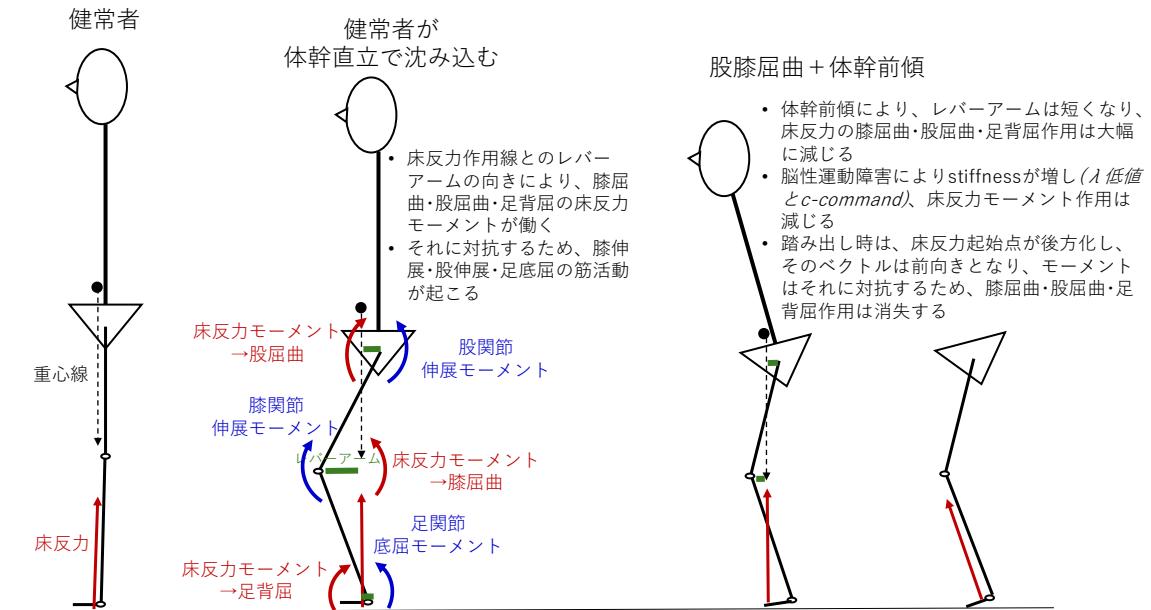
Countermovement

- 主動作に先行して反対方向に働き、パワーを増大させる
- stretch-shortening cycle*、機械的エネルギー蓄積が神経機序
*筋腱複合体をすばやく伸張(eccentric)させた直後に短縮(concentric)させることで、通常より大きな力を出す
 - 弾性エネルギーを貯蔵する stretch reflexが関与する
 - 伸長性相で高い活動状態に入っていると、そのまま高い力発揮状態を持ち越す
運動単位の活性化状態の持ち越し
(preactivation / residual force enhancement)

脳性麻痺アテトーゼの運動障害はこの障害を含む

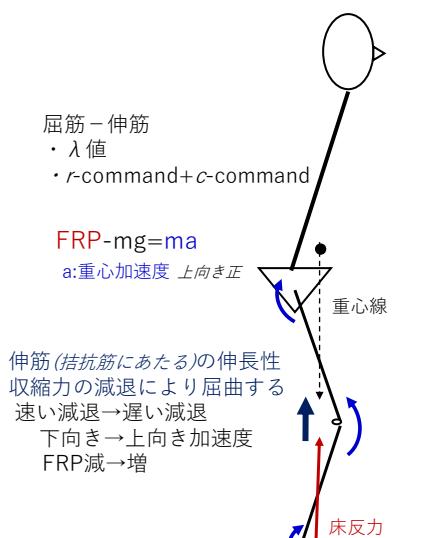
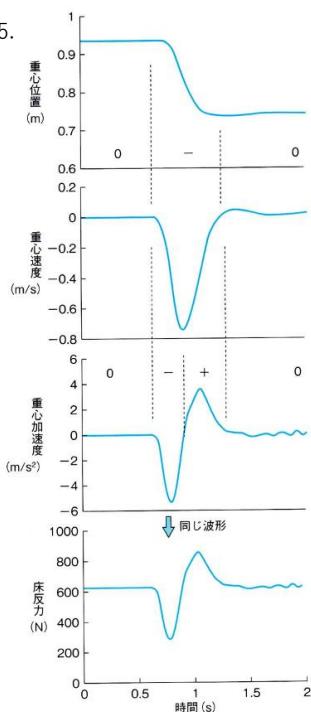
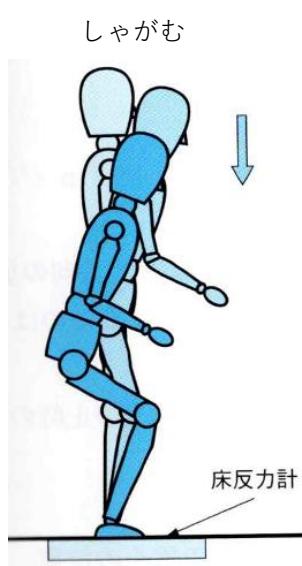
6

Couch gaitの力学



7

前田哲男他. 使えるバイオメカニクス. 2015.



8

4

Latash論による発達期脳性運動障害論

- 胎児(早産児)・新生児・乳児の運動発達を、synergyと λ (tonic stretch reflex閾値)の変遷で理解する。synergyはCPG(central pattern generator)発現程度を含む
- 筋トーヌス(筋緊張)は棄却する
 - 均一な安静筋(静止筋)・受動筋は存在しない。筋過活動が常態なこともあります(例えば、dystonia)
 - 筋収縮張力と筋線維・筋外線維の弾性・粘性を区別はできない
 - 脳性運動障害では、以下により他動的関節可動域が減少する いわゆる拘縮
 - ①非変性筋の張力増(stiffness)
 - ②筋線維の変性(脳性ミオパチー)に伴う張力増
 - ③筋外線維の変性に伴う張力増
- 姿勢保持と随意運動の連続をequilibrium-point hypothesis(EPH)・synergy・uncontrolled manifold (UCM)で考える *tensegrityもある
- 特定の筋群の過活動をその筋群の λ の低値で、低活動は λ の高値で説明する。この λ は脳性調整を受けるものとする
- 通常の筋活動は共収縮(co-contraction, co-activation)であり、完全な相反抑制(reciprocal inhibition)は例外的である。c-command, r-commandの脳性調整を受ける
- Spasticity・dystonia・ataxiaは λ 値とc-・r-commandの脳性調整の破綻によるものとする
 - *Spasticityの速い伸長に対するtonic stretch reflexの亢進は λ 低値だけでは説明できないので、phasic stretch reflexの亢進もある
- 反復増悪性筋過活動状態・paroxysmal sympathetic hyperactivity・severe acute motor exacerbationsは同一の筋過活動の病態であり、これも λ 値とc-・r-commandの脳性調整の破綻によるものとする

9

発達期脳性運動障害症候(横地)の再考

- 新生児期には強い基盤筋過活動状態(writhing)にある。その筋活動には下記の優勢活動筋がある
 - 上肢筋は、以下のサルのぶら下がりに要する筋群が優勢活動である
 - 肩伸展・内転・内旋の筋群 **広背筋**・大円筋・大胸筋鎖骨頭・僧帽筋下部・菱形筋
 - 肘屈筋 上腕二頭筋長頭・腕橈骨筋・上腕筋
 - 手掌屈筋
 - 頸部筋は**頸後屈筋**、頸筋は**頸閉鎖筋**が優勢活動である
 - 下肢筋は、推進のcountermovementとしての**股屈曲・膝屈曲・足背屈**の筋群が優勢活動である
- 正常発達では2歳までに、この新生児型基盤筋過活動は不顕性化し、直立二足歩行の股伸展荷重運動ネットワークが完成する
- 発達期脳性運動障害では、新生児型基盤筋過活動の存続(股屈曲過活動)、股伸展荷重運動ネットワーク(股伸展荷重制限)の未完が共存する(運動発達障害)。これに、錐体路運動出力制限(分離運動制限)が荷重されるもの、基盤筋活動制御不能により過剰随伴運動(共収縮制御障害)の荷重がみられるものがある

10

運動発達障害

股屈曲過活動優勢型【股屈曲型】

- ・過剰な股屈曲・内転が常時みられるものである。股膝屈曲基盤筋活動の抑制が十分に起こらないし、上肢基盤筋活動の抑制も不十分である
- ・股屈曲位で起立し、体幹は前傾する。重心の後方化もあり。股屈筋の骨盤後傾に対抗するため、腹直筋が過稼動し脊柱後弯となる。股屈筋はバネ様張力を保持しており、**踏みしぬ**がみられる
- ・軽度の肩伸展・内転・内旋・頸伸展の優勢はみられる。手の前方に出にくさがあり。手指の偏位、過大な指運動もあり。過大な開口もみられる

股伸展荷重制限優勢型【股外転型】

- ・股外転・屈曲(屈曲程度は多様)が常時みられるものである。抑制股伸展荷重が十分に起こらず、下肢上肢の基盤筋活動の消退も不十分である
- ・下肢伸展荷重は制限があり、起立は股外転となる。軽度の股屈曲・腰椎前弯はある。体幹前傾し、重心前方化もあり。軽度の足底屈はあり
- ・肩伸展・内転・内旋・頸伸展の筋活動がわずかに優勢である
- ・中脳病変ではこれが増強する *脊髄運動ネットワークを抑制する

股伸展荷重制限進展足底屈型【固定的足底屈型】

- ・股伸展荷重制限が進展し、足底屈が固定的(他動的足背屈制限)となる

股屈曲過活動・股伸展荷重制限混合共収縮型【共収縮型】

- ・股屈曲過活動と股伸展荷重制限が混在し、基盤筋拮抗筋も過収縮となり、両筋とも stiffnessが増し、運動は緩徐となる

11

分離運動制限

- ・錐体路の脳性運動出力が遮断されると、最も単純なsynergyのみが出現する(Blunnstromのabsolute synergy)。Blunnstrom下肢共同運動は発達期脳性運動障害にも適用できる(上肢については不適用とする)
- ・単関節運動が可能ならば、共同運動を脱しているとみなす。膝分離伸展がこの代表的な分離運動である。なので、absolute synergyしか発現しない状況を分離運動制限とみなす

共収縮制御障害

- ・運動開始に伴う基盤筋活動の抑制が得られず、基盤筋活動と対抗する筋活動が過大となり、運動可動域の制限、運動方向の偏位、反抗運動がみられる。過大な筋活動に随伴して、体幹運動による代償、anticipatory postural adjustments(予測的姿勢調整)・countermovementの変容が起こる
- ・上肢運動では、肩伸展・内転・内旋・肘屈曲・手掌屈・頸伸展・口閉じの筋活動が優勢であり、肩屈曲・外転・外旋運動は制限される。それを代償するための体幹前傾・側屈・回旋が起こる。肩回旋運動(過大なcountermovementと肩内転・内旋を活用)、上肢前方到達運動時の肘伸展固定も起こる。また、肩運動と連合して(anticipatory postural adjustmentsとcountermovementの複合)、上肢到達方向とは遠ざかるような頸回旋・側屈・前屈の動きが入る(急速またはsaccadic)。よって、中心視の保持は不能であり、周辺視が主体であろう。口では、過大な開口、過剰な側方運動がみられる
- ・下肢運動では、広背筋過活動の腰椎伸展と腸腰筋過活動の股屈曲が競合し、同部のstiffnessが増し、無動化する。移動運動開始時、これらに対抗して、股伸筋・股外転筋・膝伸筋・足底屈筋の活動が過大に起こる。それでも運動可動域の制限され、運動の変容が起こる。骨盤前方化・股外転・膝伸展が起こる。よって、体幹回旋による前方推進が起こる

12

いわゆる拘縮

- 脳性運動障害では、以下により他動的関節可動域が減少する
 - 非変性筋の張力増(stiffness) 拘縮≠筋変性
 - 筋線維の変性(脳性ミオパチー)に伴う張力増
 - 筋外線維の変性に伴う張力増
- 脳性ミオパチーは筋過活動によって起こる (筋弛緩ではなく)
 - 関節可動端位で固まる
 - 関節端位で縮む筋と伸びる筋がある
 - 伸展拘縮なら、伸筋が縮む筋で、屈筋が伸びる筋
 - 足底屈拘縮では、下腿三頭筋が縮む筋で、前脛骨筋が伸びる筋
 - 筋MRIの変性筋は下腿三頭筋
→過収縮筋が変性する
 - 屈曲拘縮なら、屈筋が縮む筋で、伸筋が伸びる筋
 - 筋過収縮状態では $r\text{-command} > c\text{-command}$ であり、agonistが変性する