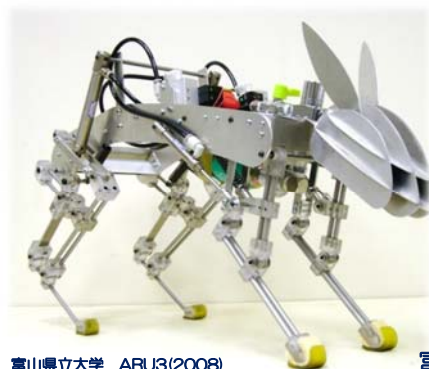


動物の筋骨格系に学ぶ運動制御



富山県立大学 ARU3(2008)

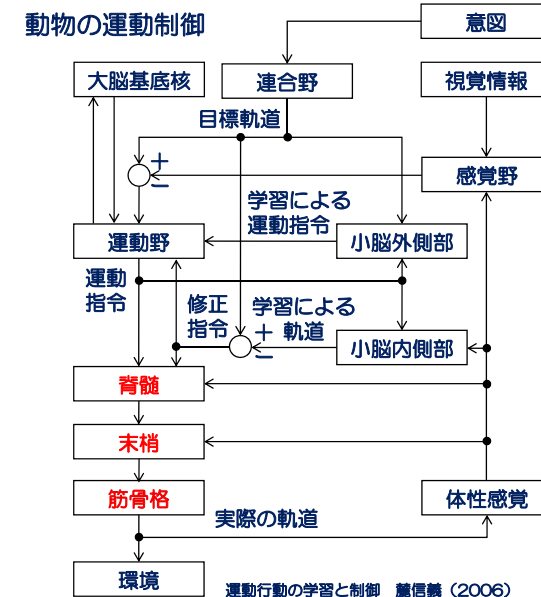
2013/7/13
富山県立大学工学部
知能デザイン工学科
大島 徹
oshima@pu-toyama.ac.jp

脚移動ロボット (ASIMO)

- Hondaが定めた自律機械としてのロボットに必要な要素
 1. とっさに足を出して姿勢を保つ「**高次元姿勢バランス**」
 2. 周囲のヒトの動きなどの変化を複数のセンサからの情報を総合して推定する「**外界認識**」
 3. 集めた情報から予測して、ヒトの操作の介在なしに自ら次の行動を判断する「**自律行動生成**」
- 2011年11月時点
身長 130cm 幅 45cm 奥行 34cm 重量 48kgf
最大速度 9km/h 稼働時間 40分 (歩行時)
- 関節自由度 57 (頭部 3, 腕部 7×2, 手部 13×2, 腰部 2, 脚部 6×2)

脚移動ロボットの運動制御技術の確立

- **コントローラ (制御装置) 重視**
 - 1989 仮想コンプライアンス制御による着地制御
 - 1989 位置制御と力制御
 - 1992 足首コンプライアンス制御
 - 1992 ZMP制御による姿勢の安定化
 - 1992 両脚コンプライアンス制御による床反力制御
 - 1993 上体による歩容の安定性
 - 1996 腕と脚の協調による姿勢安定性
 - 1998 足首コンプライアンス制御と両脚コンプライアンス制御のハイブリッド制御
 - 1999 全身協調動的制御による姿勢の安定性
- **フィードバック制御系**
- **大きな変化がみられないメカニズム (制御対象)**



- **中枢**
随意運動
安定で強靱な制御系
- **脊髄**
リズム運動
反射運動+随意運動
- **末梢**
反射運動
生得的
- **筋骨格**
制御対象
運動の基本メカニズム

動物の運動制御

●超低速なヒト（動物）の制御系

ヒトの反応時間 : 0.1~0.3秒
 音刺激・跳躍動作 筋収縮開始まで : 0.21秒
 筋収縮終了まで : 0.36秒

高速運動では、フィードバック制御系（制御装置）の構成が困難

●オープンループ制御

イカやカマキリの捕獲はオープンループ制御
 D. J. McFarland (1971)

●パターン発生器CPG

除脳猫による脊髄内のパターン発生器CPGの存在
 S.Grillner (1981)

●脊髄による運動制御

脳による運動制御と脊髄による運動制御の分離
 A.Gellatly (1998)

動物の脚の基本的筋骨格系

●基本的な運動を生成できるメカニズム

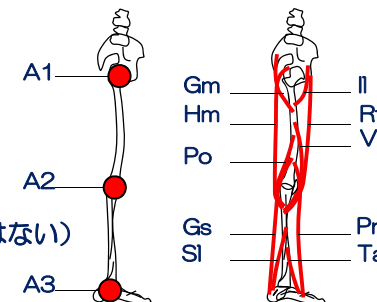
ロボットとは異なるアクチュエータ（筋）配列

●矢状面3自由度（股関節、膝関節、足関節）の運動に対して

ロボットは、3つのアクチュエータ A1, A2, A3

動物は、少なくとも10の筋 筋の数=2+(自由度-1)×4

Gm : 大殿筋
 Il : 腸骨筋
 Hm : ハムストリングス
 Rf : 大腿直筋
 Po : 膝窩筋
 Vs : 広筋群
 Gs : 腓腹筋
 Pr : 腓骨筋（足底歩行動物にはない）
 Sl : ひらめ筋
 Ta : 前頸骨筋



一関節筋と二関節筋

●筋

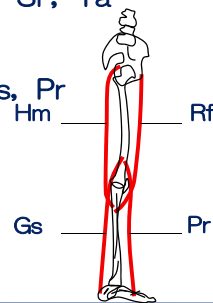
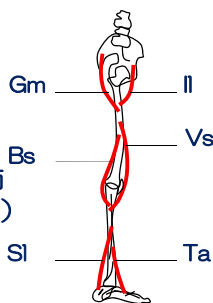
筋は1方向にしか運動できない
 拮抗することで、筋力の差で力を、和で硬さを調節
 軽量 (1.1g/cm³) で大きな力 (40~100N/cm²)
 小さなサイズ (直径1~2μm) でも機能

●一関節筋

1つの関節運動に関与する筋 Gm, Il, Bs, Vs, Sl, Ta

●二関節筋

2つの関節運動に関与する二関節筋 Hm, Rf, Gs, Pr

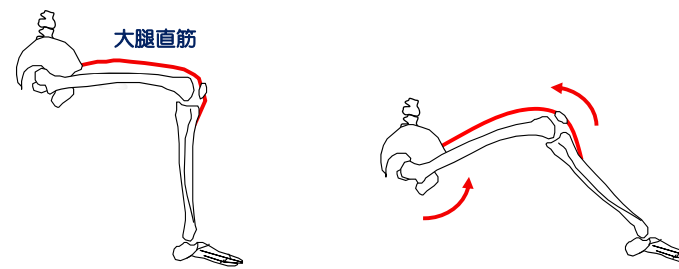


二関節筋

●C.Galen (131-201)

M. rectus femoris (大腿直筋) ...
 When it is tensed,
 it naturally not only draws up
 the tibia (脛骨) toward itself,
 but also flexes the femur (大腿骨) ...

解剖学を知らない医者は設計図を描けない建築家



二関節筋と系先端のインピーダンス制御

- **N.Hogan** (~1985)
四肢末端の力と位置の関係を等ポテンシャル楕円体によって解析し、二関節筋の手先のインピーダンス制御への関与
- **J.MacIntyle, E.Bizzi** (~1993)
Equilibrium Point Model を提唱し、二関節筋による力と位置の制御
- **K.Ito** (1992~)
筋空間、関節空間、作業空間でのインピーダンスの関係と二関節筋の役割
- **T.Oshima, M.Kumamoto** (1994~)
Muscular Coordination Control Model を提唱し、一関節筋と二関節筋の協調による系先端の力制御、軌道制御

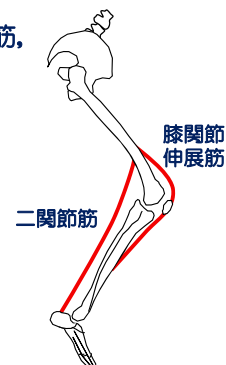
二関節筋の冗長性

- **進化の結果**としてのアクチュエータ（筋）配列
運動制御に合理性があることは示されている、示されつつある

故障時に限定的機能を維持することが生存のために重要であり、進化の結果としての理由付けとしては十分な根拠となり得る
- **工学システム**
冗長なアクチュエータ構成をとることは一般には合理的な方策とはされていない
- **動物に学ぶ**
動物に学ぶことに良いことがあるはず、という考え方を人工物に適用する工学者の立場からは、それ以上の明確な利点がないと、合理性は説明しにくい

メカニズムとしての二関節筋

- **Giovanni A. Borelli** (1681)
骨格と腱のメカニズムにより、四肢の動き方、バランスのとり方、体重の支え方
- **B.Wimsley** (1978)
ネコ下肢筋にストレンゲージを埋入し、膝関節伸展筋（一関節筋、二関節筋）が主動筋、二関節筋は張力発生要素、足関節一関節筋はほとんど活動しない
- **Van Ingen Schenau** (1993)
跳躍模型（Jumping Jack）により、二関節筋は動力伝達要素
- **T.Spaguele** (1999)
ヒトの筋電図シミュレーションにより、跳躍時の二関節筋の筋長変化はわずか

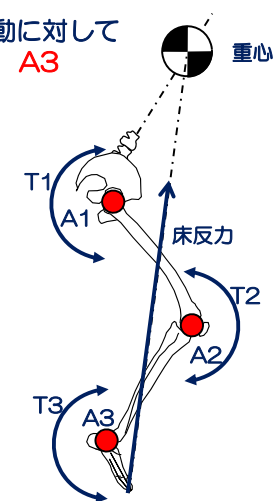


ロボットのアクチュエータ（筋）配列と跳躍

- **ロボットモデル 3自由度モデル**
3自由度（股関節、膝関節、足関節）の運動に対して3つの独立したアクチュエータ **A1, A2, A3**

離床では床反力が重心を向くように関節トルク **T1, T2, T3** を調節する

着床では床反力に抗するように関節トルク **T1, T2, T3** を調節する
- **コントローラ**
関節トルクの調節
複雑な制御則のもとで高速な演算を要求されるコントローラ



動物のアクチュエータ（筋）配列と跳躍

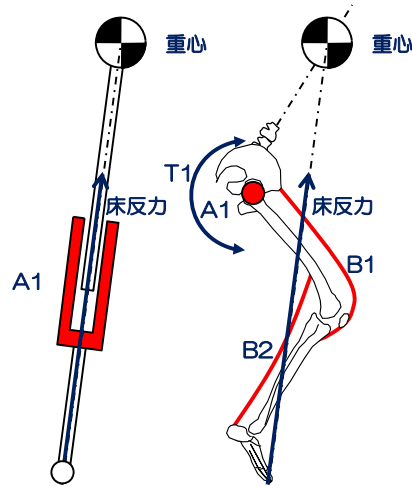
● 基本的な四肢の運動

最も重要で基本的な動作が、先端（足先）と支点（重心）を結ぶ方向への1自由度運動と考える

直動アクチュエータ A1 によって容易に実現

- 動物モデル 1自由度モデル
主動筋を上位関節におき A1 二関節筋を上位関節と下位関節を連結するリンク B1, B2 として平行リンク機構を構成

重心に質量が集中しているという仮定は必要であるが



メカニズムの合理性

● 動物モデル 1自由度モデル

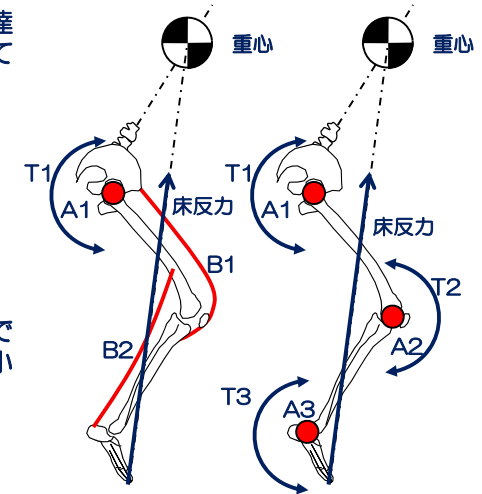
二関節筋によってトルクが伝達され、トルクが自動調節されているとみなすことができる

● 二関節筋

コントローラなしに、多関節運動で1自由度の直動運動を実現する合理的方策

● 慣性モーメント

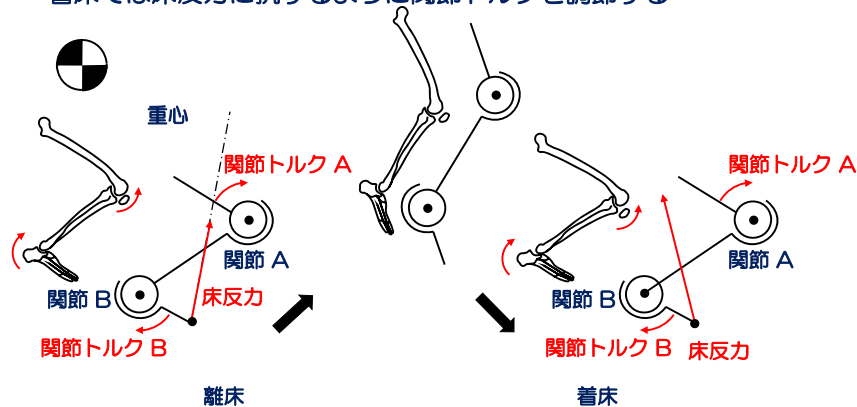
主動筋を上位関節におくことで重心周りの慣性モーメントを小さくできる合理的方策



ロボットと動物の運動制御の比較

● 歩行（走行）運動

2関節2自由度の運動に着目
離床では床反力が重心を向くように関節トルクを調節する
着床では床反力に抗するように関節トルクを調節する



ロボットのアクチュエータ（筋）配列

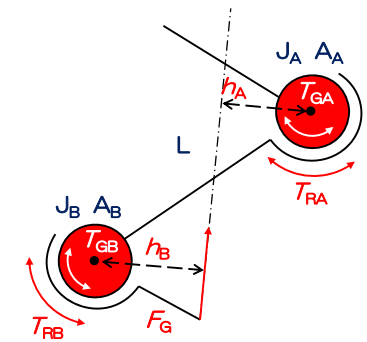
● ロボットモデル 2自由度モデル

上位関節と下位関節それぞれに独立したアクチュエータ

- 床反力と関節トルクが釣り合うためには、以下の式を満足するように関節トルクを調節する必要がある

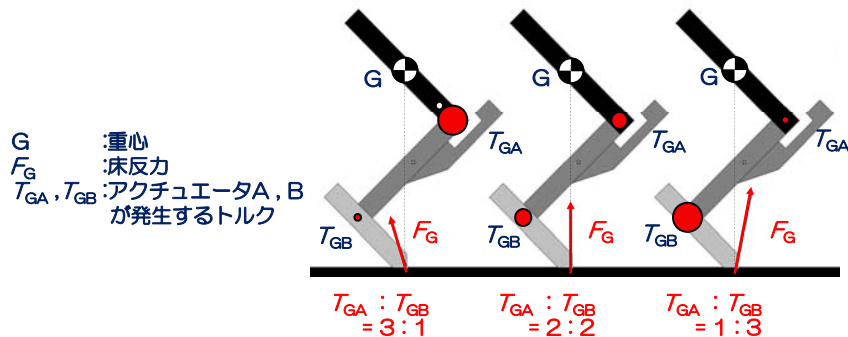
$$\begin{aligned} T_{GA} &= T_{RA} = F_G \cdot h_A \\ T_{GB} &= T_{RB} = F_G \cdot h_B \\ T_{RA} : T_{RB} &= h_A : h_B \end{aligned}$$

F_G : 床反力
 L : 床反力の方向
 J_A, J_B : 関節A, B
 A_A, A_B : 関節A, Bのアクチュエータ
 h_A, h_B : 床反力の方向Lから関節A, Bまでの距離
 T_{RA}, T_{RB} : 関節A, Bに必要とされるトルク
 T_{GA}, T_{GB} : アクチュエータA, Bが発生するトルク



コンピュータ・シミュレーション (ロボット)

- **ロボットモデル 2自由度モデル**
上位関節と下位関節それぞれに独立したアクチュエータ
- **簡単なコンピュータ・シミュレーション**
関節トルクの比によって床反力の方向が変化する



G : 重心
 F_G : 床反力
 T_{GA}, T_{GB} : アクチュエータA, B
 が発生するトルク

動物のアクチュエータ (筋) 配列

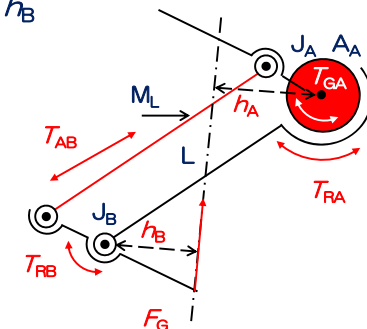
- **動物モデル 1自由度モデル**
上位関節に1つのアクチュエータ
上位関節と下位関節を連結するリンク
- 以下の式が見かけ上成り立ち、床反力と関節トルクが釣り合う

$$T_{GA} = T_{RA} + T_{AB} = F_G \cdot h_A + F_G \cdot h_B$$

$$T_{RB} = T_{AB} = F_G \cdot h_B$$

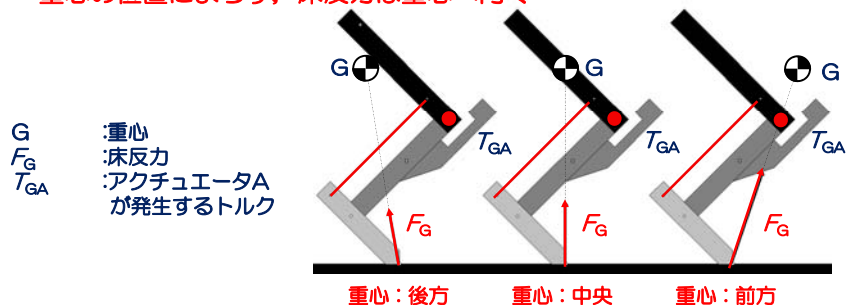
$$T_{RA} : T_{RB} = h_A : h_B$$

F_G : 床反力
 L : 床反力の方向
 J_A, J_B : 関節A, B
 A_A : 関節Aのアクチュエータ
 M_L : 関節A, Bを連結するリンク
 h_A, h_B : 床反力の方向Lから関節A, Bまでの距離
 T_{RA}, T_{RB} : 関節A, Bに必要とされるトルク
 T_{GA} : アクチュエータAが発生するトルク
 T_{AB} : 関節Aから関節Bへ伝達されるトルク



コンピュータ・シミュレーション (動物 (ヒト), 重心)

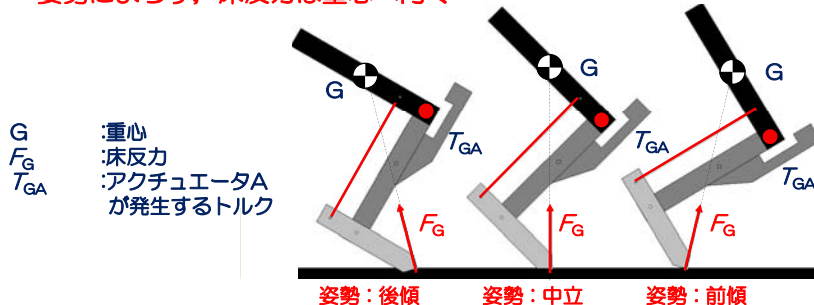
- **動物モデル 1自由度モデル**
上位関節に1つのアクチュエータ
上位関節と下位関節を連結するリンク
- **簡単なコンピュータ・シミュレーション**
重心の位置によらず、床反力は重心へ向く



G : 重心
 F_G : 床反力
 T_{GA} : アクチュエータA
 が発生するトルク

コンピュータ・シミュレーション (動物 (ヒト), 姿勢)

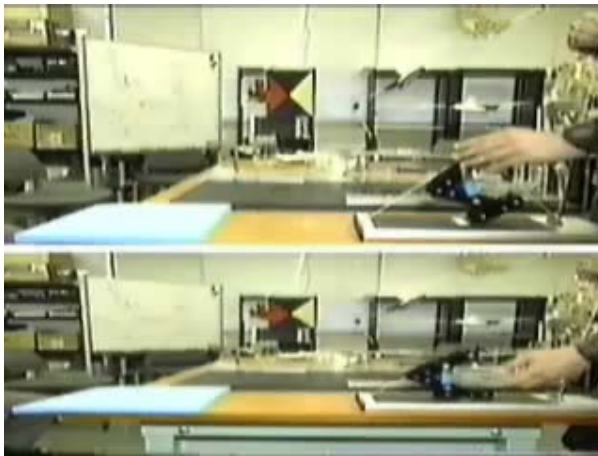
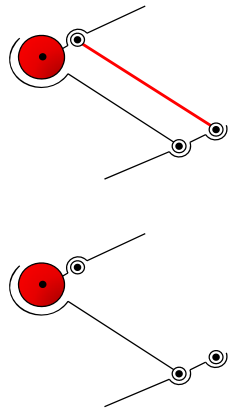
- **動物モデル 1自由度モデル**
上位関節に1つのアクチュエータ
上位関節と下位関節を連結するリンク
- **簡単なコンピュータ・シミュレーション**
姿勢によらず、床反力は重心へ向く



G : 重心
 F_G : 床反力
 T_{GA} : アクチュエータA
 が発生するトルク

脚モデル

●二関節筋の有無



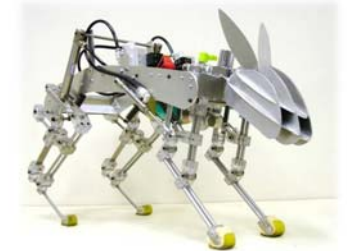
跳躍ロボット

- 体重 : 3kgf
体長 : 46cm
体高 : 17cm

- 前肢 : 2関節
後肢 : 3関節

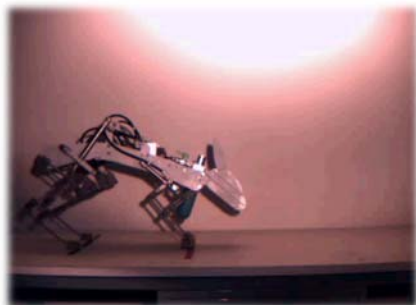
- CO₂ガスボンベ
電磁バルブ
エアシリンダ
H8マイコンによる
オープンループON/OFF制御

- 跳躍距離 : 50cm
跳躍高さ : 20cm

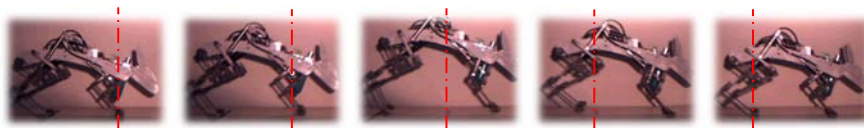


富山県立大学 ARU3 (2008)

跳躍ロボット



富山県立大学 ARU3 (2008)



跳躍ロボット

- 平行リンク機構 (パンタグラフメカニズム)
自由度の拘束
トルク伝達機能
関節間の協調運動



ネコ

- 平行リンク機構（**パンタグラフメカニズム**）
自由度の拘束
トルク伝達機能
関節間の協調運動



日本技術士会北陸本部富山県支部第19回講演会 25

集電器

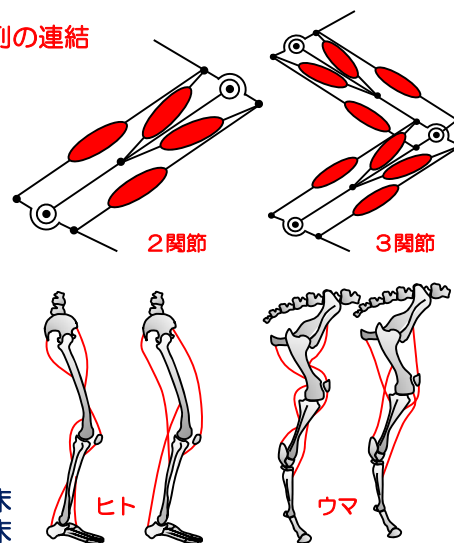
- 平行リンク機構（**パンタグラフメカニズム**）
自由度の拘束
関節間の協調運動
トルク伝達機能
安定した接触状態を保持



日本技術士会北陸本部富山県支部第19回講演会 26

ヒト（動物）の多関節アクチュエータ（筋）配列

- **基本アクチュエータ（筋）配列の連結**
2関節2自由度の運動
1対の拮抗一関節筋
1対の拮抗二関節筋
- **ヒト・ウマの筋配列**
股関節：拮抗一関節筋
大腿部：拮抗二関節筋
膝関節：拮抗一関節筋
下腿部：拮抗二関節筋（ウマ）
二関節筋（ヒト）
足関節：拮抗一関節筋
足部：…



日本技術士会北陸本部富山県支部第19回講演会 27

ロボット工学の弊害

- **ロボット**
制御装置は大きく進歩したが、
制御対象であるメカニズムはほとんど変わらない
- **動物**
多くが、ロボット工学で急速に進歩した運動制御理論を用いて、
動物の運動制御を論じている
- **Louis R. Amundsen (1990)**
工学者が提案する運動評価システムは、容易に結果を提供してくれる。
膝の運動に限った筋力の評価であっても、裏切られることがある。
機能的運動能力の予測が的確になされていないといった批判もある。
- **理学療法士**
多くの理学療法士がロボット工学を学び、ヒトの運動を表現できない
ことに気づき始めている。

日本技術士会北陸本部富山県支部第19回講演会 28

バイオメカニクス

- 順運動学的 詳細な筋骨格系モデルを構築し、最適化手法を用いて運動を生成する**トップダウン的アプローチ**
 - 逆運動学的 計測された運動パターンから生体内を推定する**ボトムアップ的アプローチ**
- 膨大なパラメータや生理学的な実験データの不足に対して**
- 統合による分析 (Analysis by Synthesis)
トップダウン的アプローチにより仮説をたて、
ボトムアップ的アプローチによりモデルを構築し、
仮説をモデルで検証する
 - 工学・医学・生物学…の融合

バイオミメティックテクノロジー

- 野生ゴボウの種 → ベルクロテープ
 - サメ肌 → 競泳水着
 - 蓮の葉 → 撥水性素材
 - 蚊の針 → 痛くない注射針
 - コウモリの反響定位 → レーダー、ソナー
 - フクロウの風切羽根 → 新幹線の翼型パンタグラフ
 - カワセミのくちばし → 新幹線のフロントノーズ
 - モルフォ蝶の鱗粉 → 光発色繊維
- 運動制御の生体模倣** → **ロボットの運動制御技術**