

冗長な筋骨格系が発揮する力

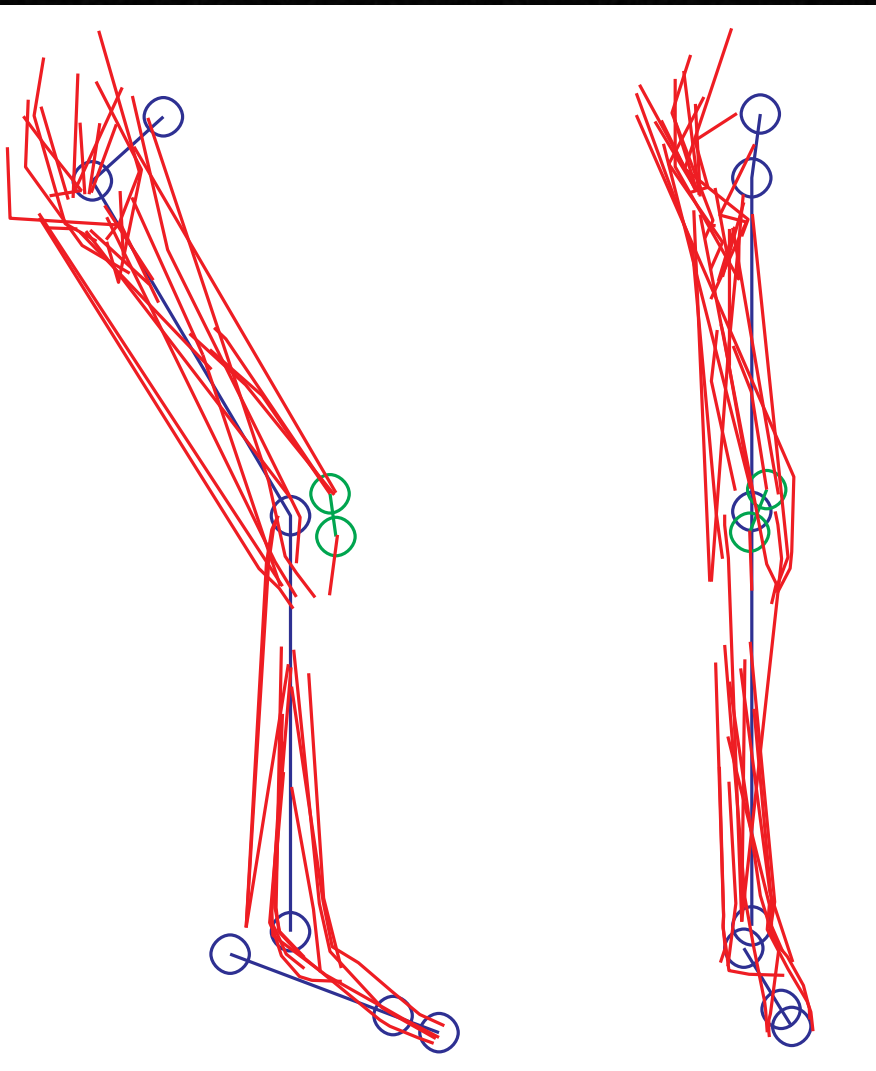
東京大学大学院教育学研究科

身体教育学コース 准教授

野崎大地

†: このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。引用情報のない図版は、講演者の有する著作物の中から引用されたものです。

筋骨格系の冗長性



下肢の筋骨格モデル
Delp (1990)を元に作成

冗長：

くだくだしく長いこと。

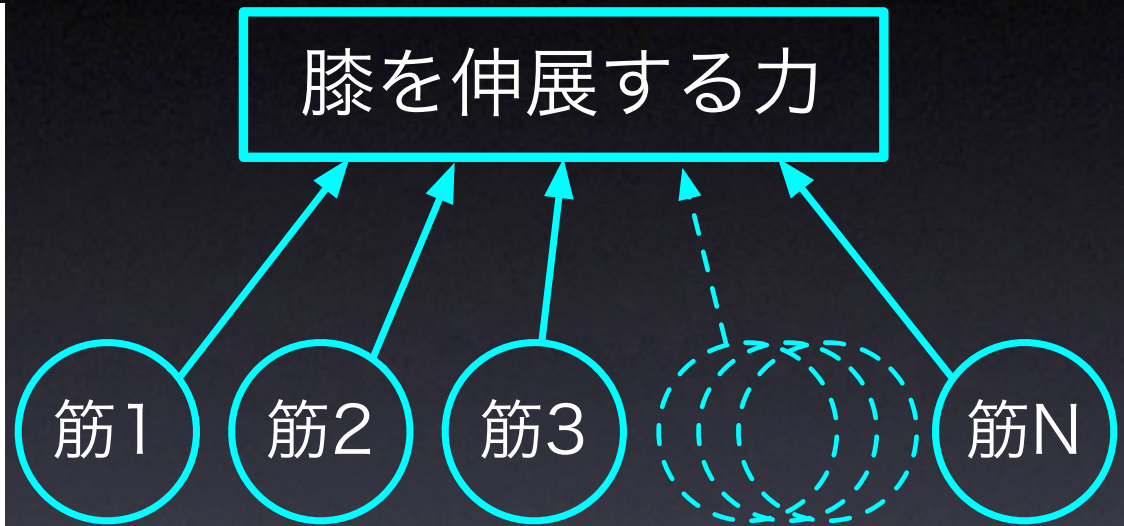
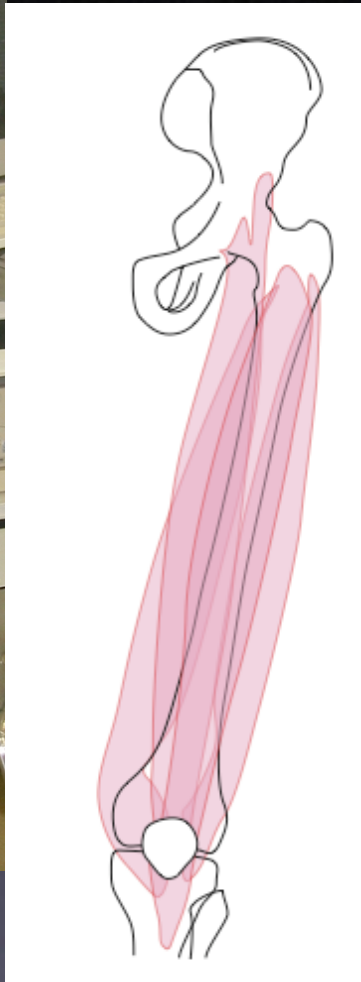
「冗長な文章」 (広辞苑)

筋骨格系の冗長性：一つの関節を複数の筋肉（筋）が跨いでいること。似た機能の筋が複数存在すること。

力分配問題 (Force Sharing Problem)



膝の伸展・屈曲

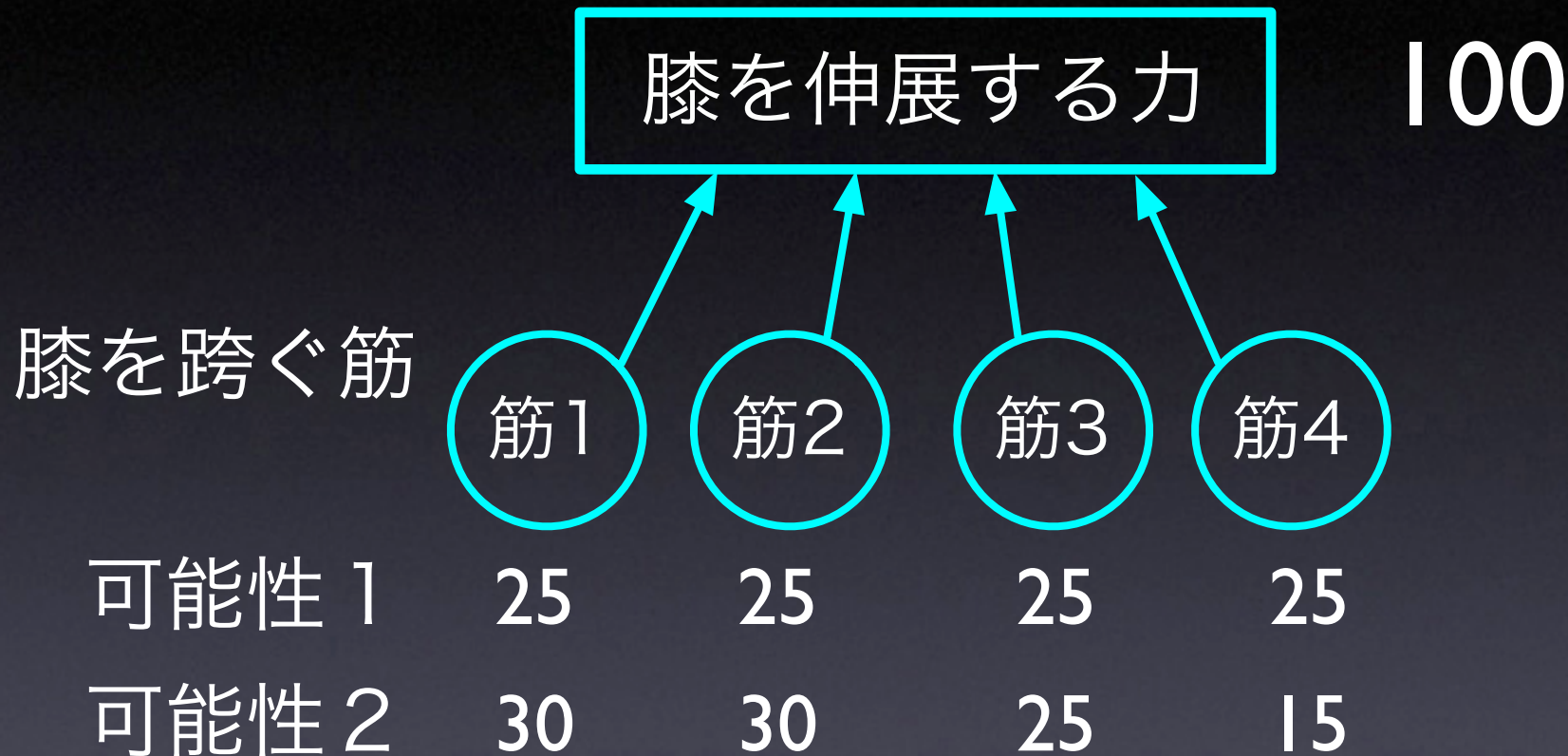


各筋の貢献度（負担度）は
どのようにして決まるか？

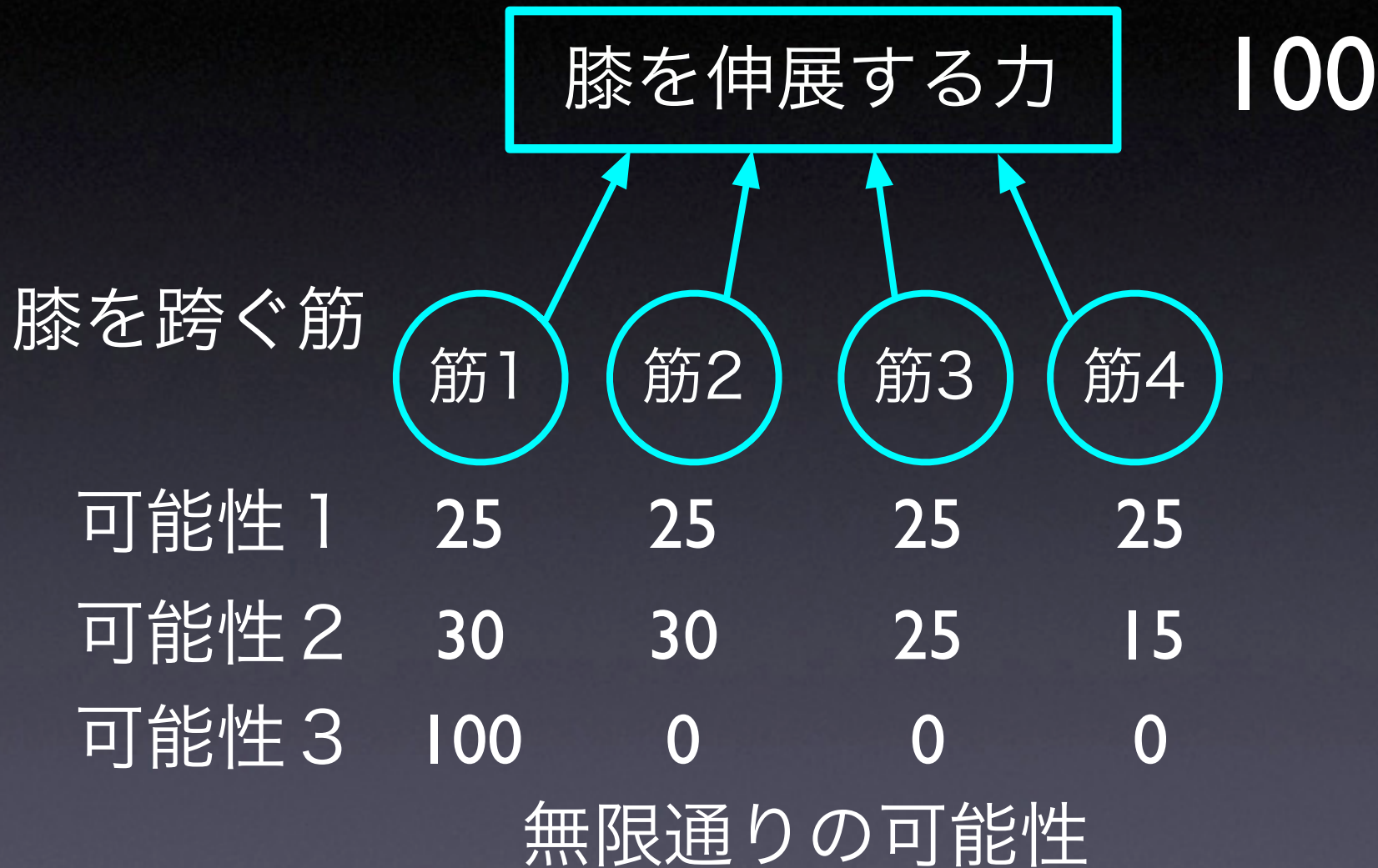
解は無限に存在



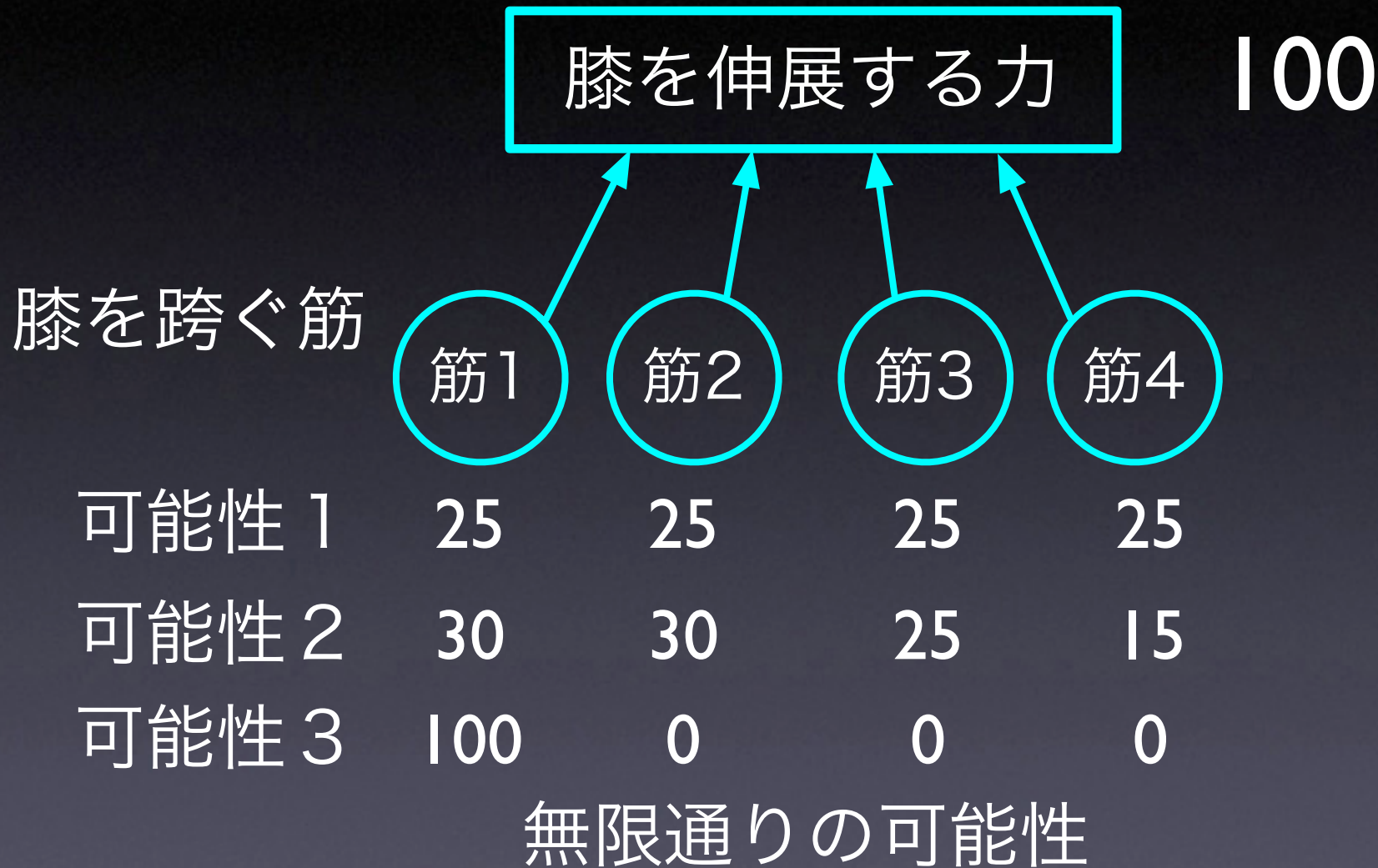
解は無限に存在



解は無限に存在

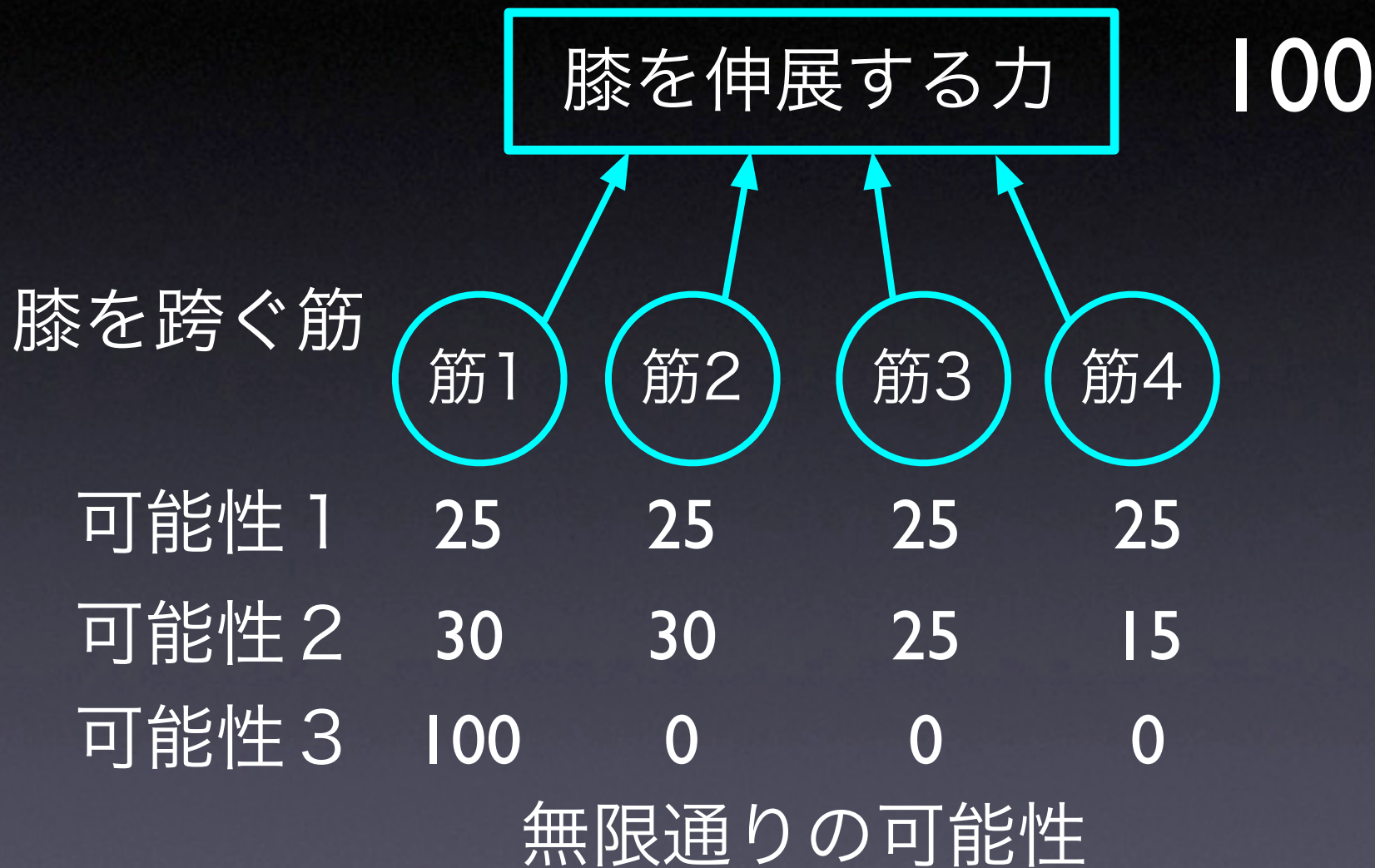


解は無限に存在



実際には一通りに決まっている

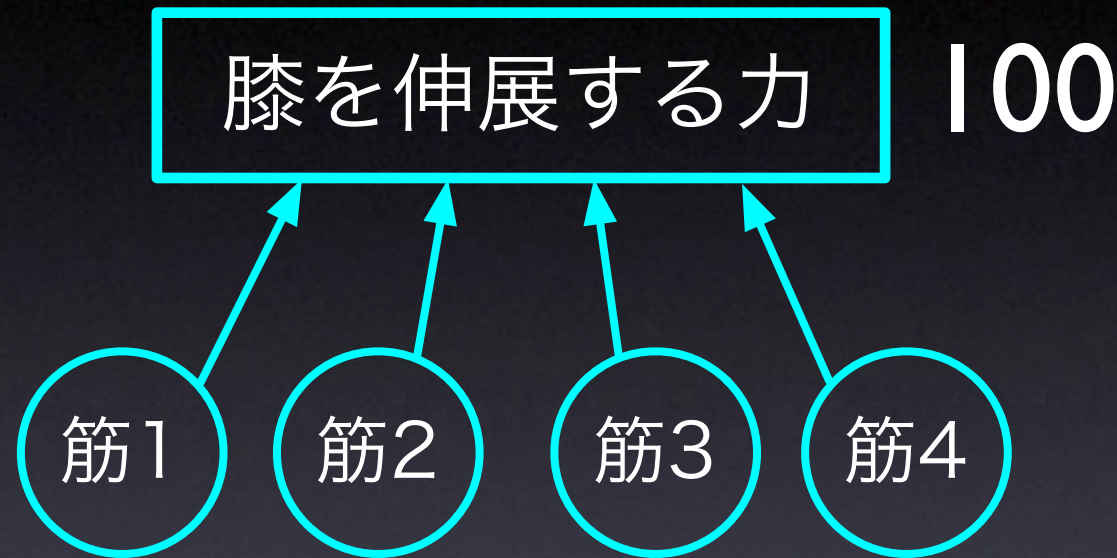
解は無限に存在



実際には一通りに決まっている

機序

可能性が一つに絞られる機序



筋の太さに応じて負担が決まる

太さ比率	1	1	1	1
負担	25	25	25	25
太さ比率	4	3	2	1
負担	40	30	20	10

1 自由度モデル

様々な仮説：

筋の太さに応じて

各筋の発揮力の二乗和が最小になるように

各筋の活動度の和（二乗和）が最小になるように

.....

各筋の貢献度は決まる

1 自由度モデル

様々な仮説：

筋の太さに応じて

各筋の発揮力の二乗和が最小になるように

各筋の活動度の和（二乗和）が最小になるように

.....

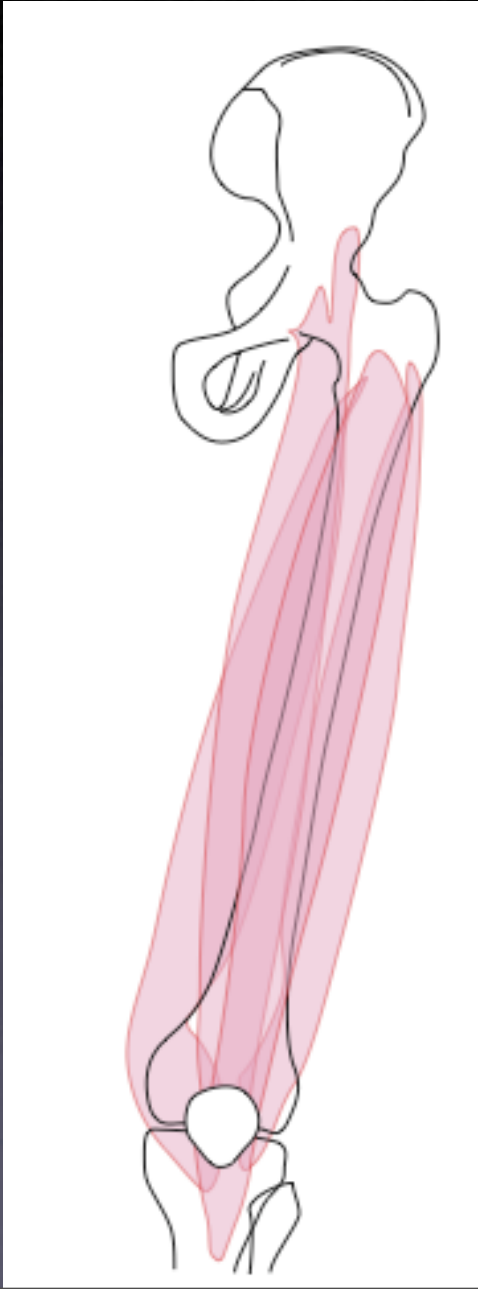
各筋の貢献度は決まる

関節で発揮
される力



当該関節を跨
ぐ筋の活動度

単関節筋と二関節筋



大腿四頭筋

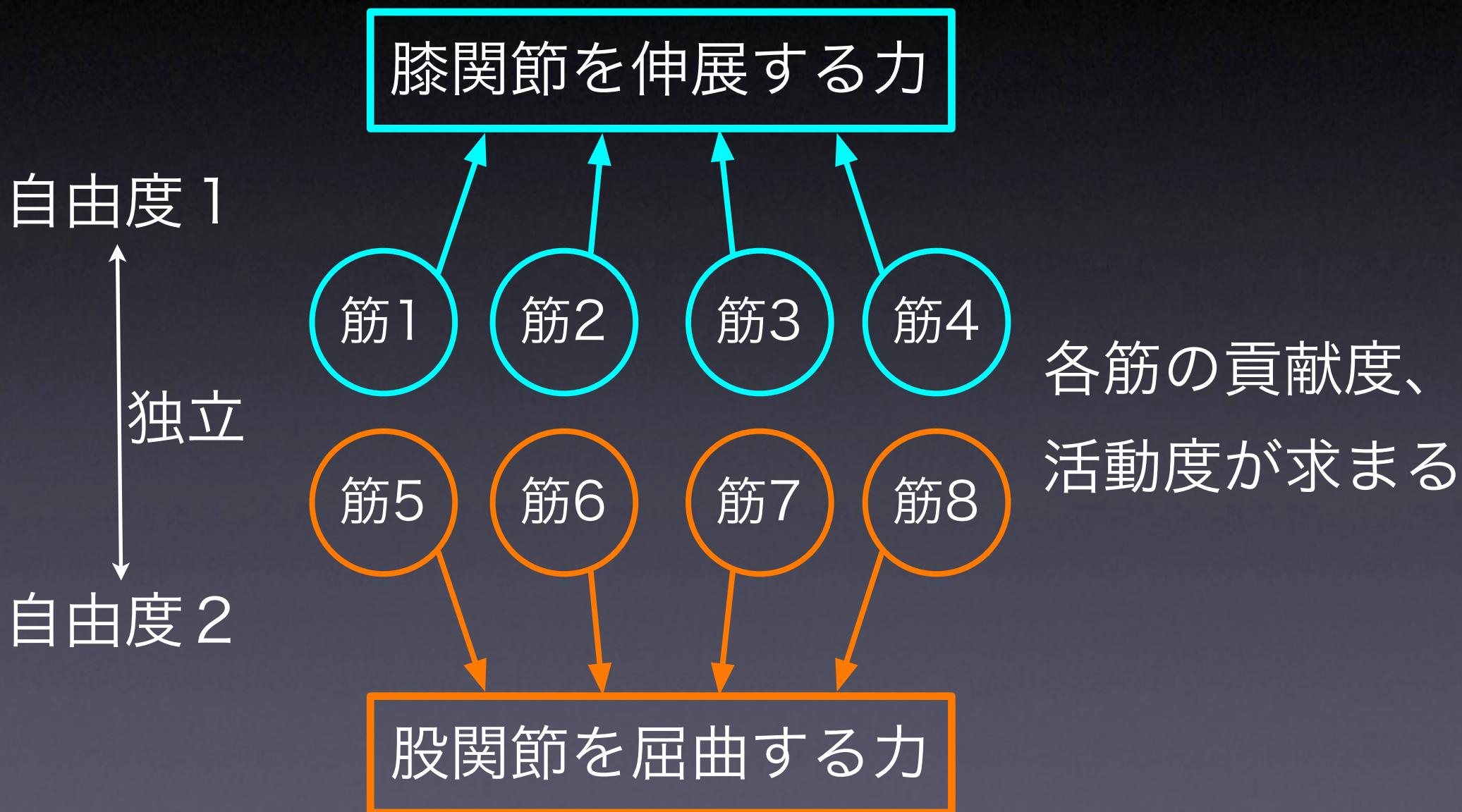
外側広筋、内側広筋、中間広筋

→ 単関節筋（膝関節のみ跨ぐ）

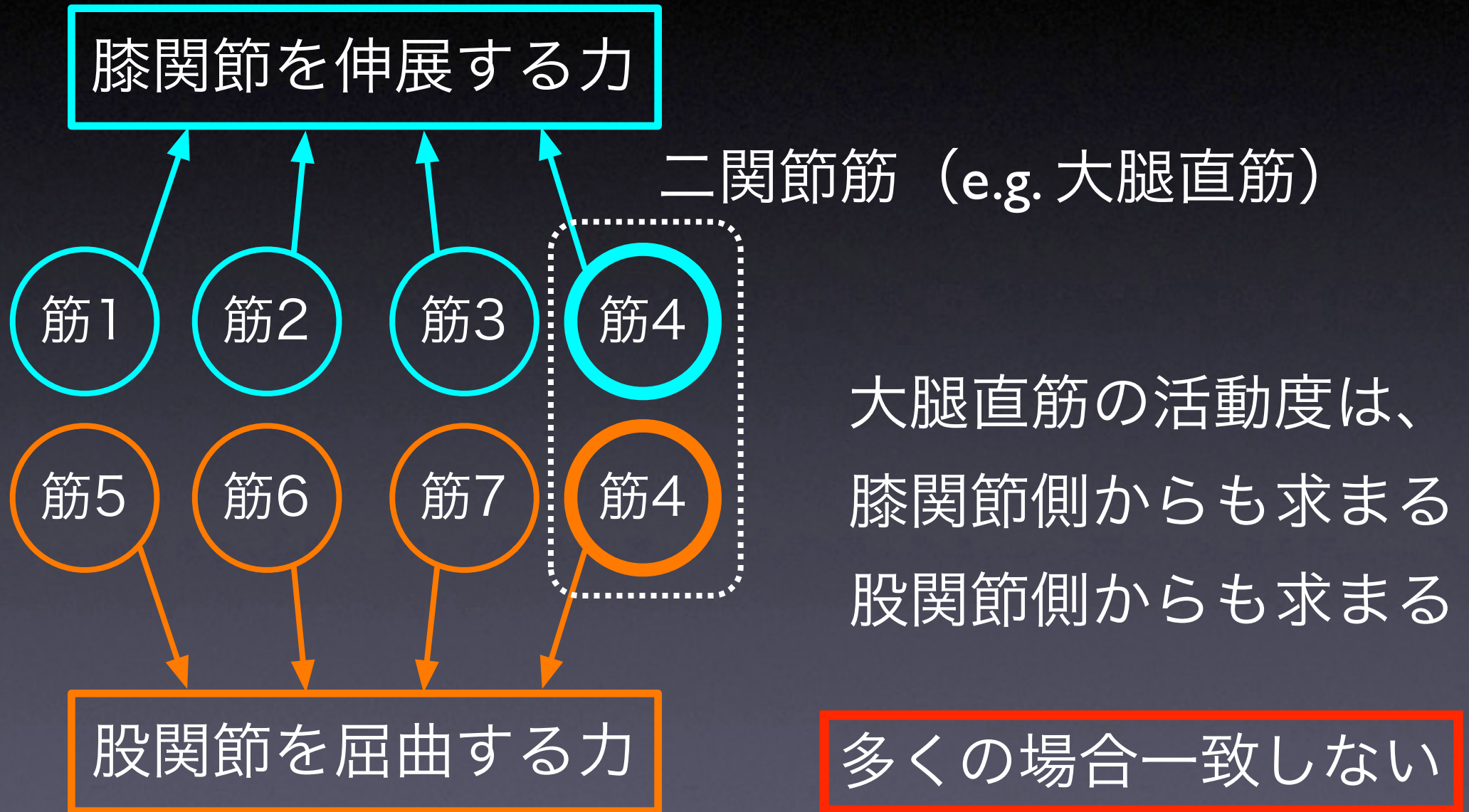
大腿直筋

→ 二関節筋（股関節も跨ぐ）

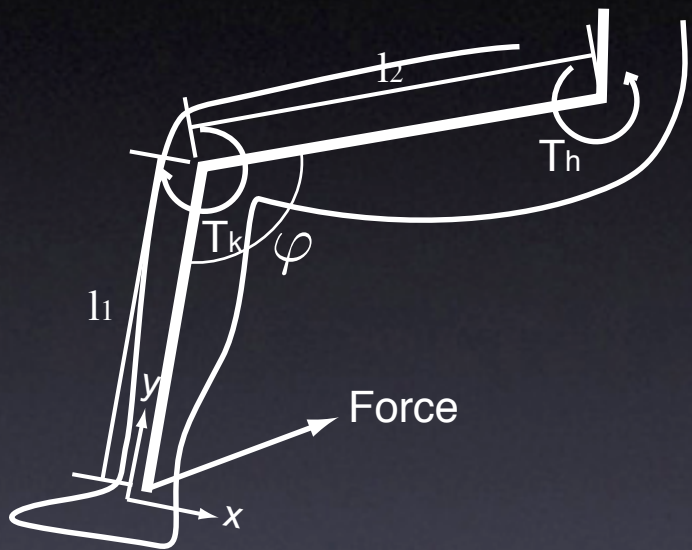
二関節筋がなければ...



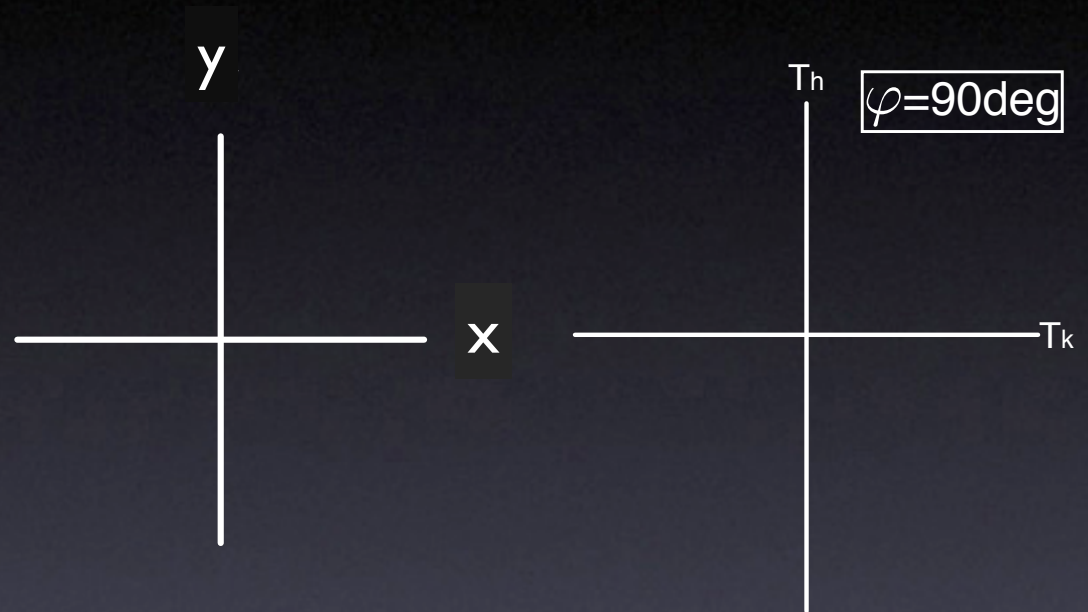
二関節筋：問題を複雑化する要因



カベクトル制御課題

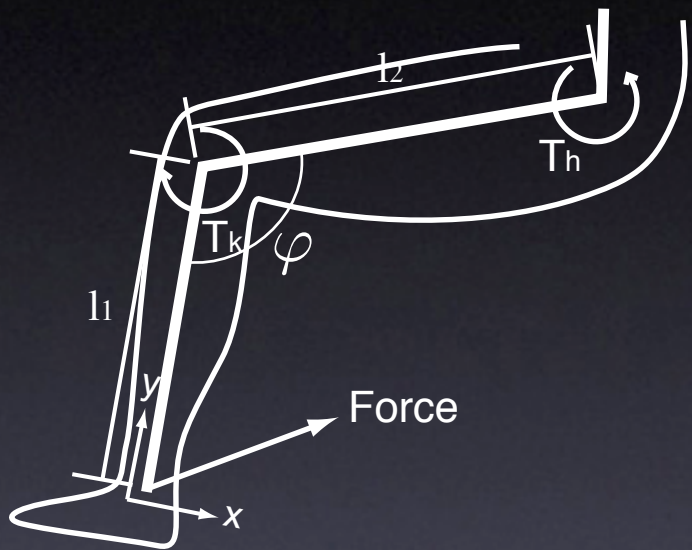


等尺性力発揮

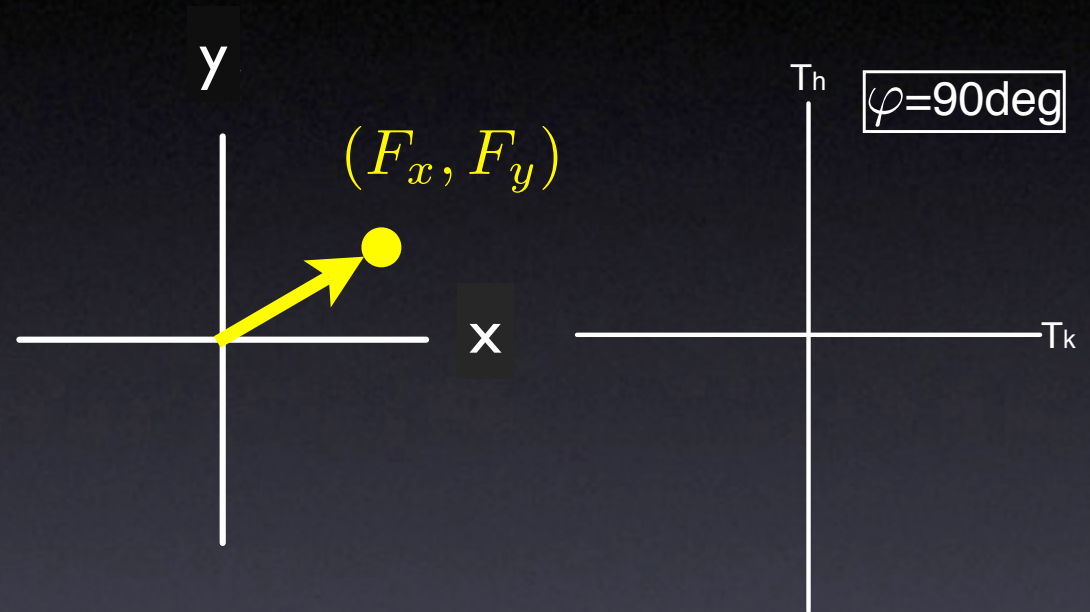


Nozaki et al., J Appl Physiol, 2005

カベクトル制御課題

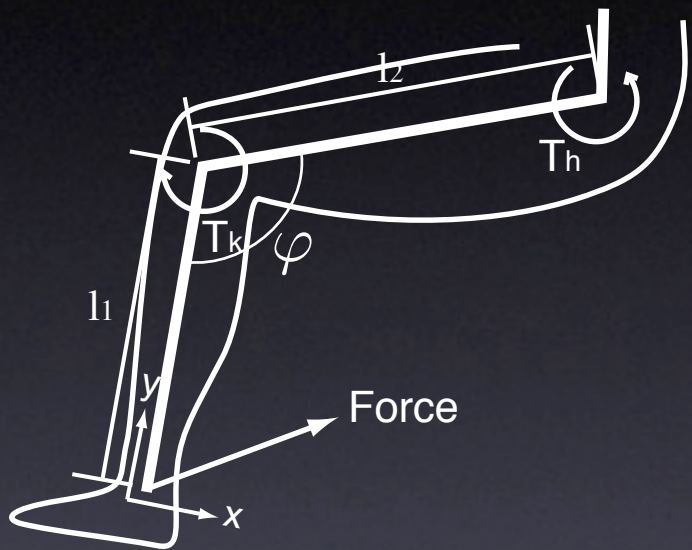


等尺性力発揮

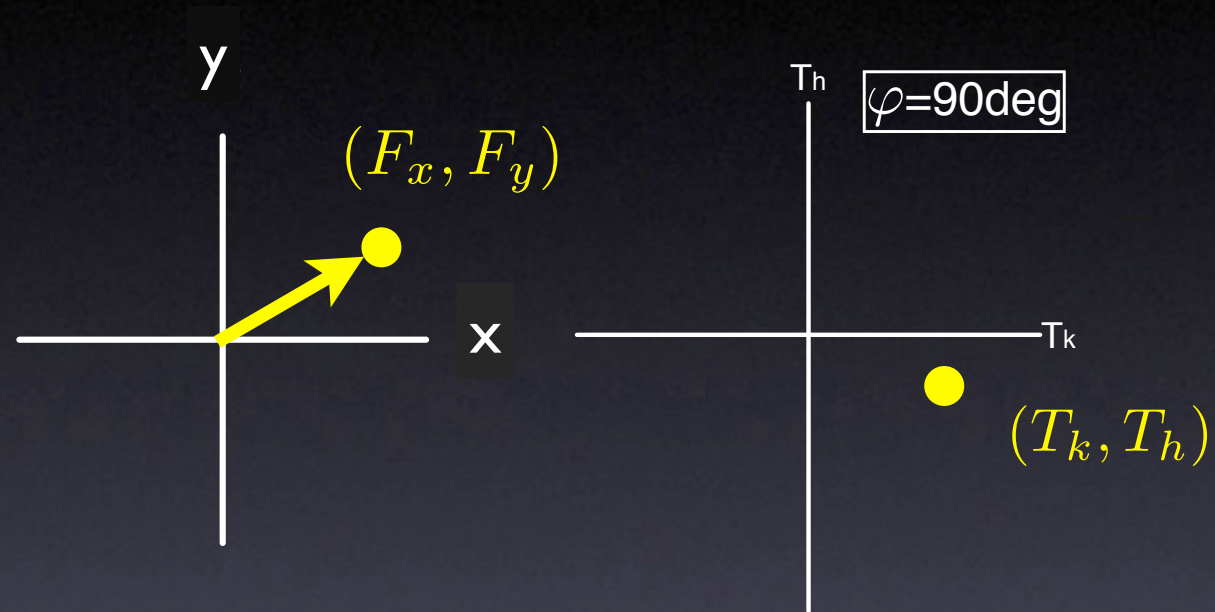


Nozaki et al., J Appl Physiol, 2005

カベクトル制御課題

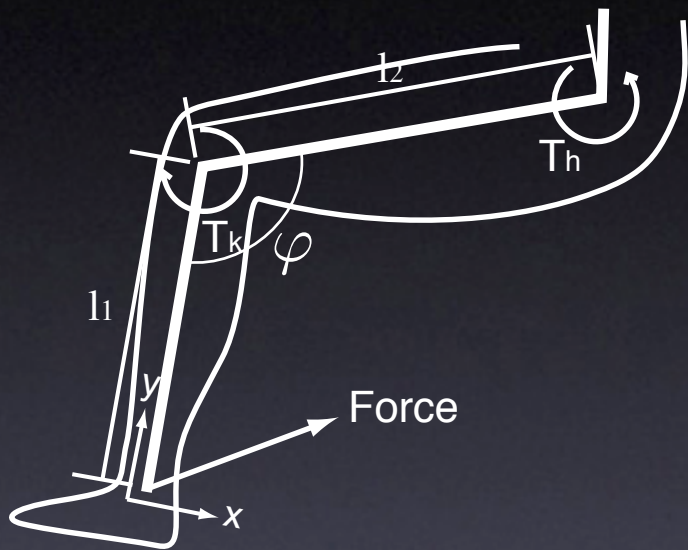


等尺性力発揮

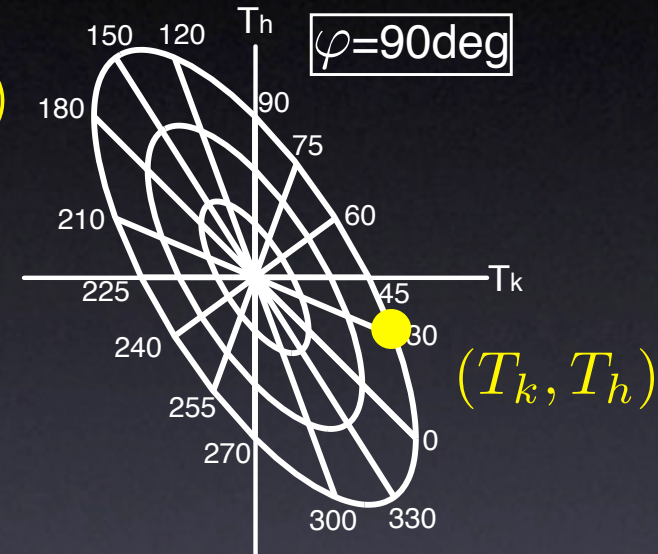
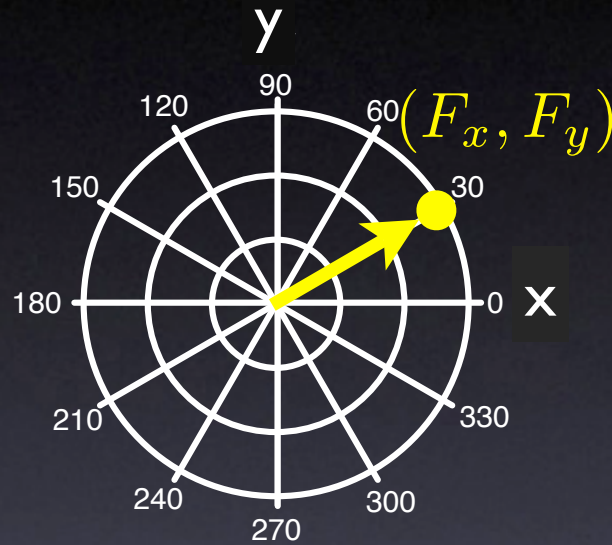


Nozaki et al., J Appl Physiol, 2005

カベクトル制御課題



等尺性力発揮

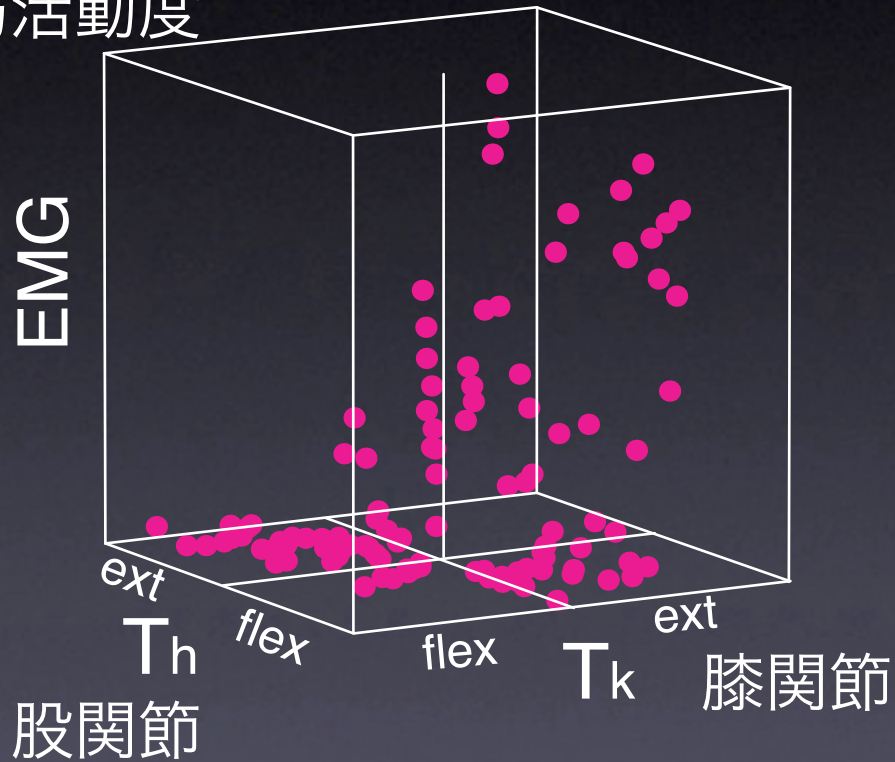


Nozaki et al., J Appl Physiol, 2005

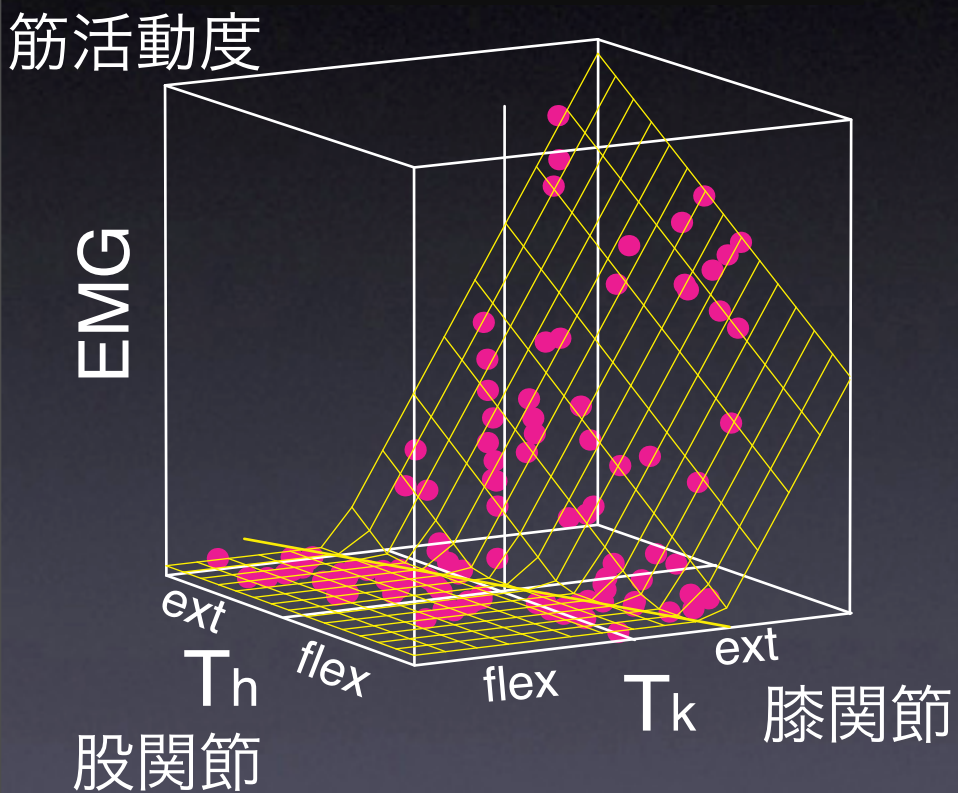
様々な組合せの膝関節・股関節トルクを同時に発揮する。

筋活動度と関節トルクの関係

筋活動度

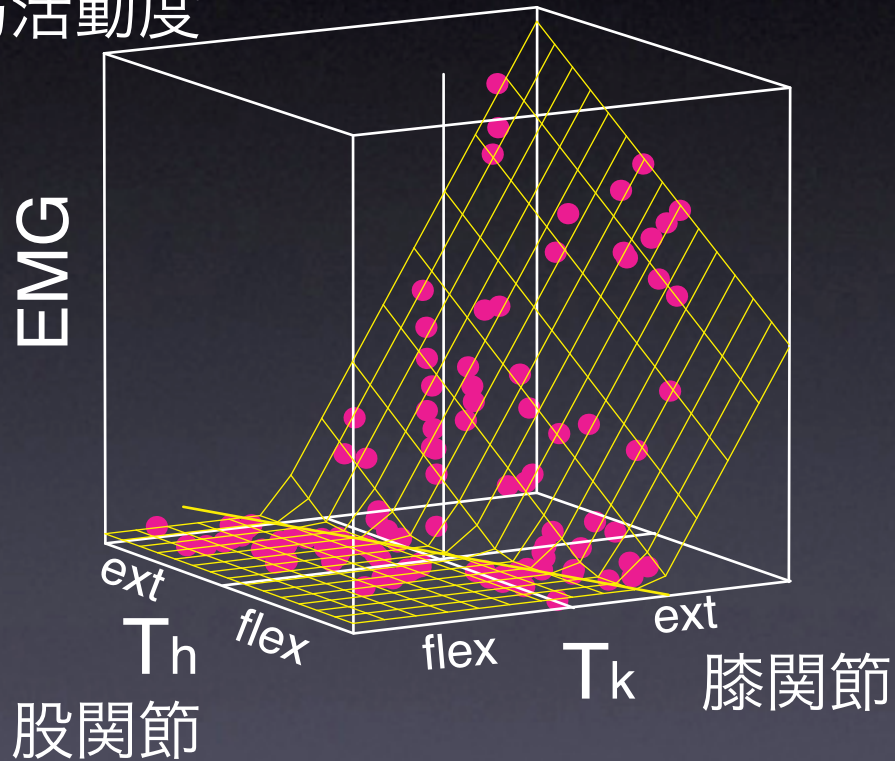


筋活動度と関節トルクの関係



筋活動度と関節トルクの関係

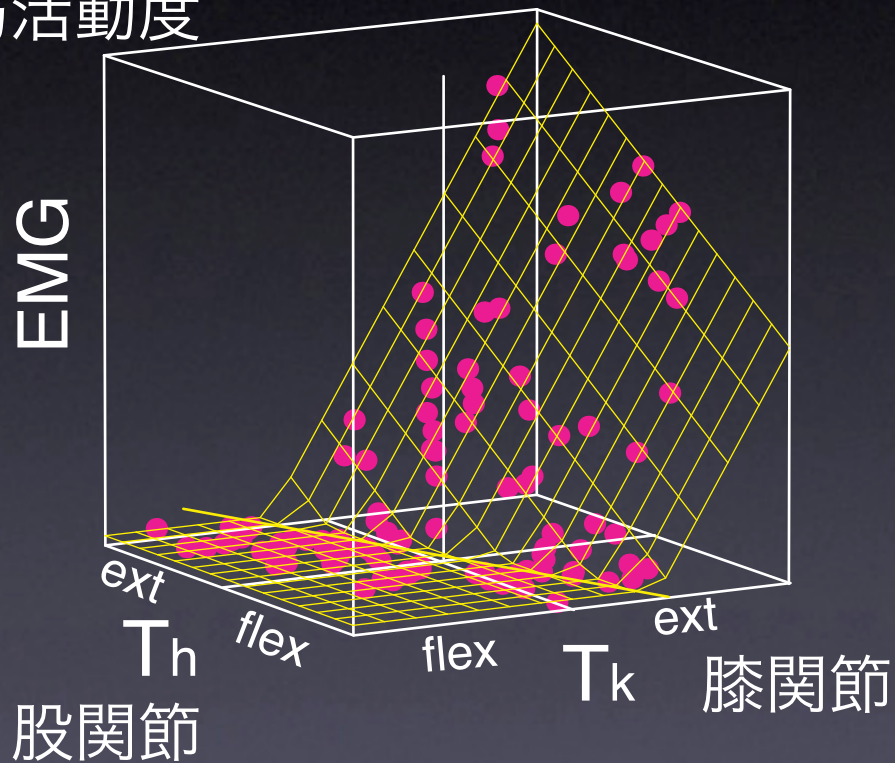
筋活動度



$$M = \lfloor aT_k + bT_h \rfloor$$

筋活動度と関節トルクの関係

筋活動度

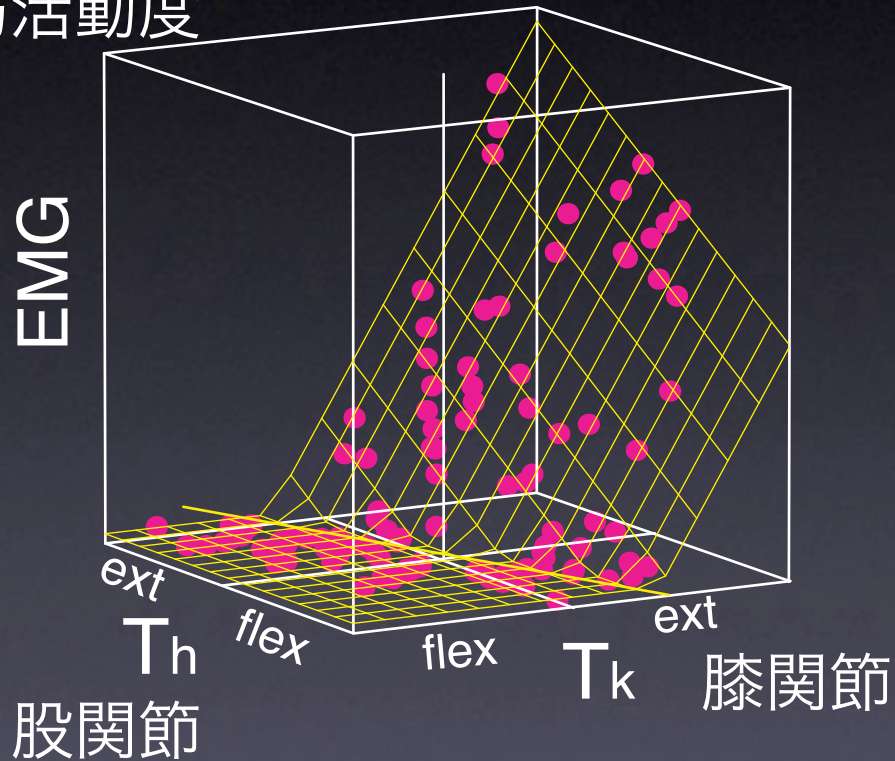


$$M = \lfloor aT_k + bT_h \rfloor$$

意外に単純で美しい

筋活動度と関節トルクの関係

筋活動度



$$M = [aT_k + bT_h]$$

$$= \mathbf{T} \cdot \mathbf{P} \quad (\text{内積})$$

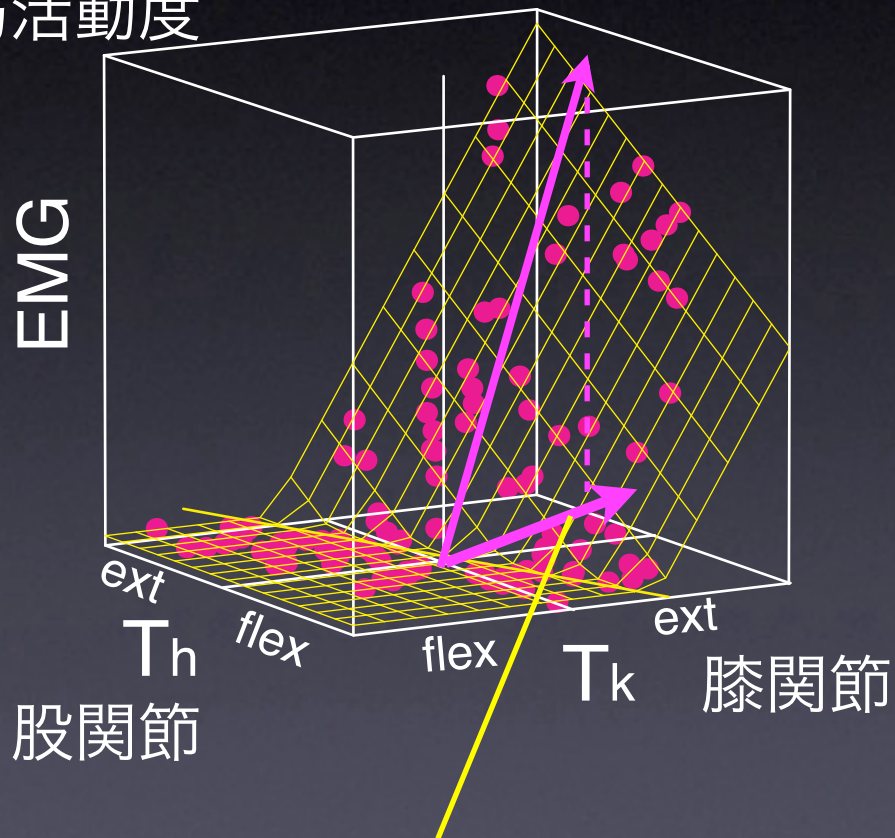
$$\mathbf{T} = (T_k, T_h)$$

$$\mathbf{P} = (a, b)$$

意外に単純で美しい

筋活動度と関節トルクの関係

筋活動度



$$M = [aT_k + bT_h]$$

$$= \mathbf{T} \cdot \mathbf{P} \quad (\text{内積})$$

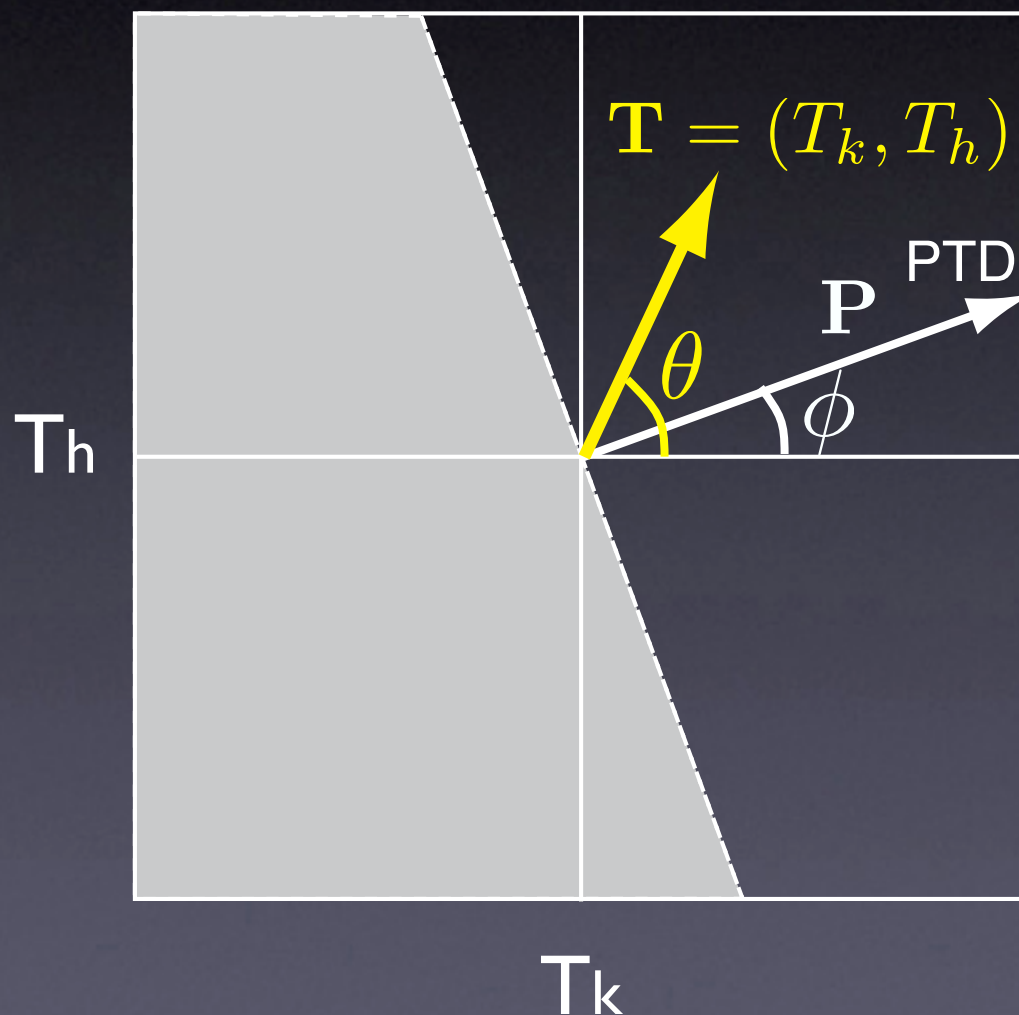
$$\mathbf{T} = (T_k, T_h)$$

$$\mathbf{P} = (a, b)$$

意外に単純で美しい

至適方向 (Preferred Torque Direction)

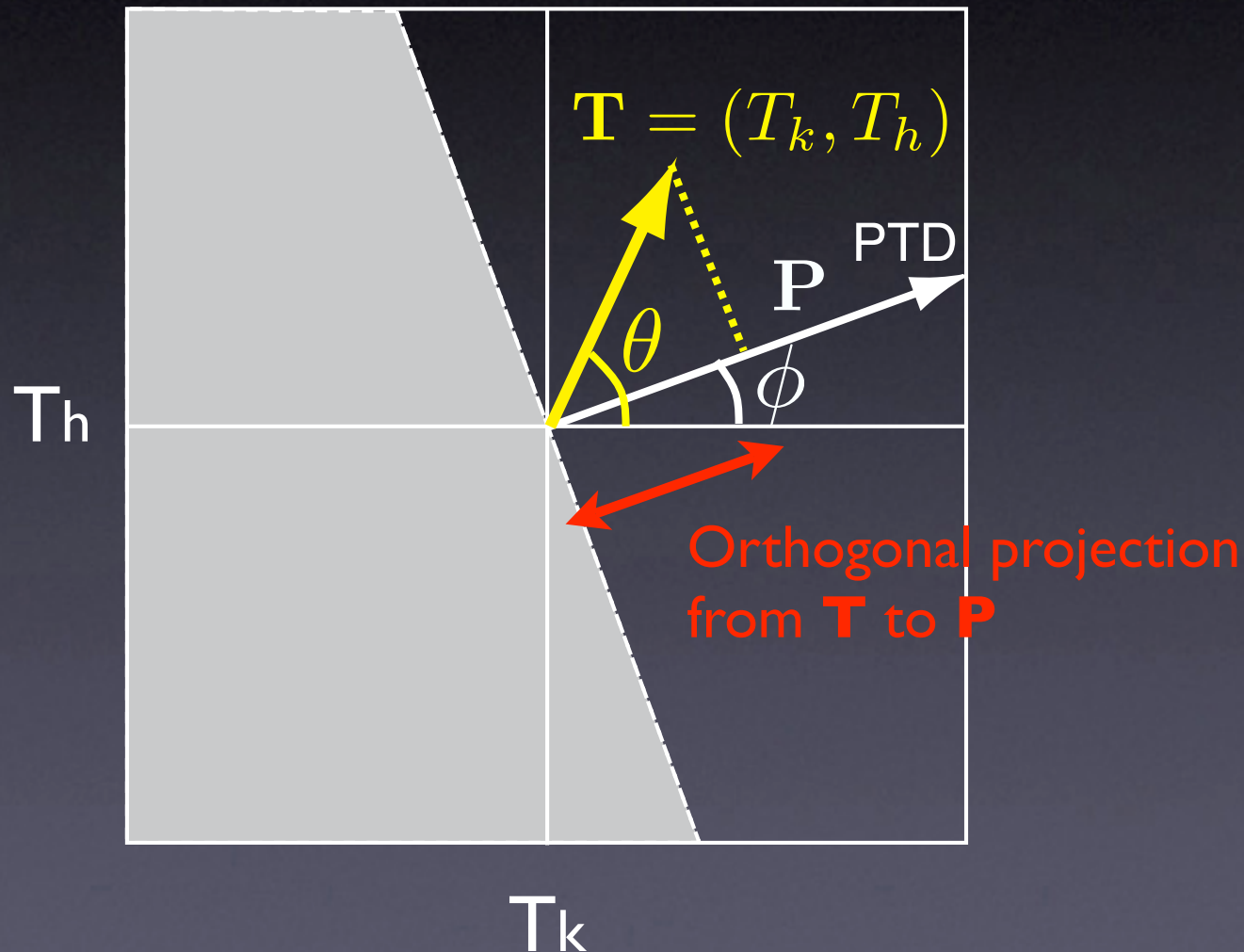
単純な筋活動度変調の機序



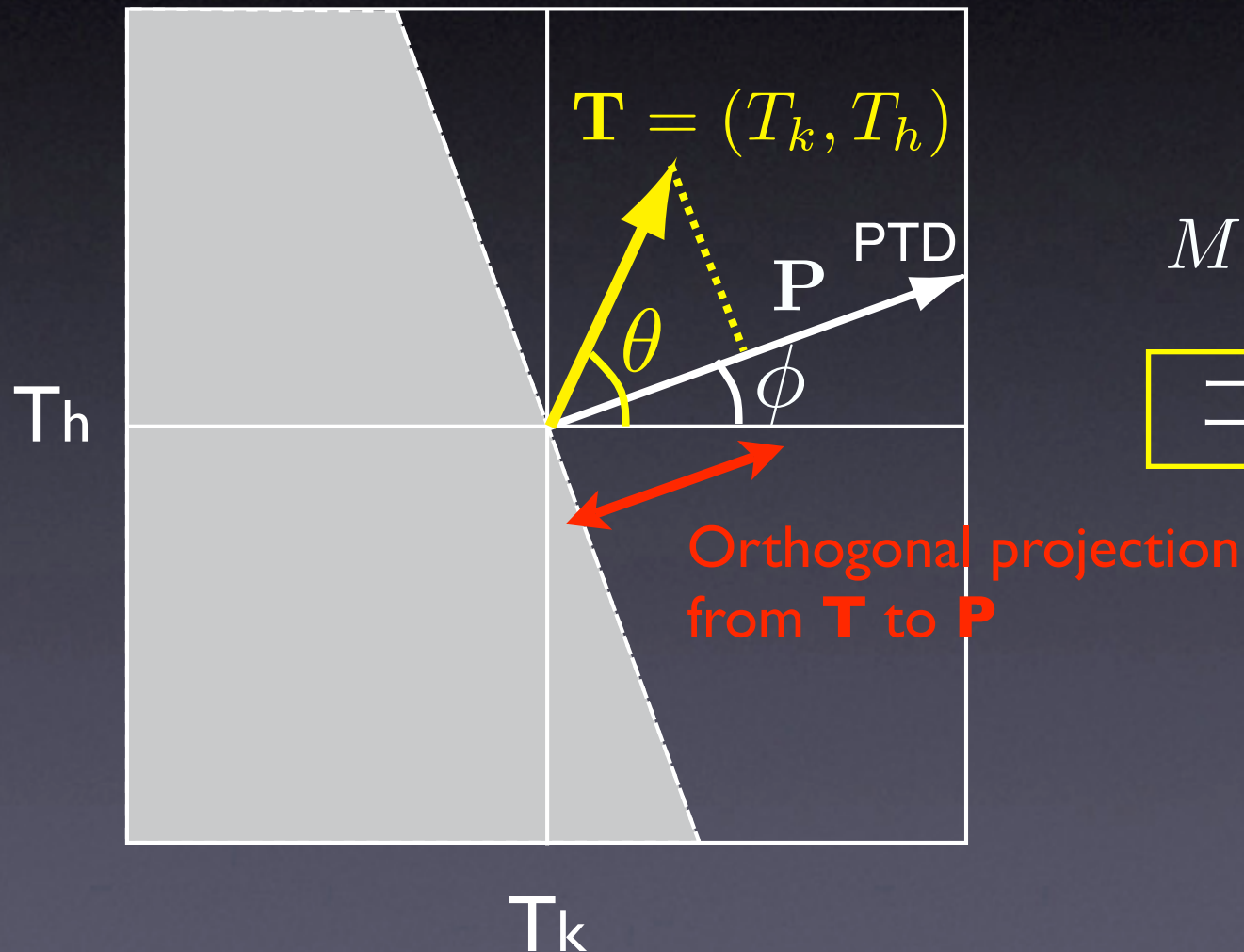
$$M = \lfloor aT_k + bT_h \rfloor$$
$$= \mathbf{T} \cdot \mathbf{P}$$

単純な筋活動度変調の機序

$$M = [aT_k + bT_h]$$
$$= \mathbf{T} \cdot \mathbf{P}$$



単純な筋活動度変調の機序

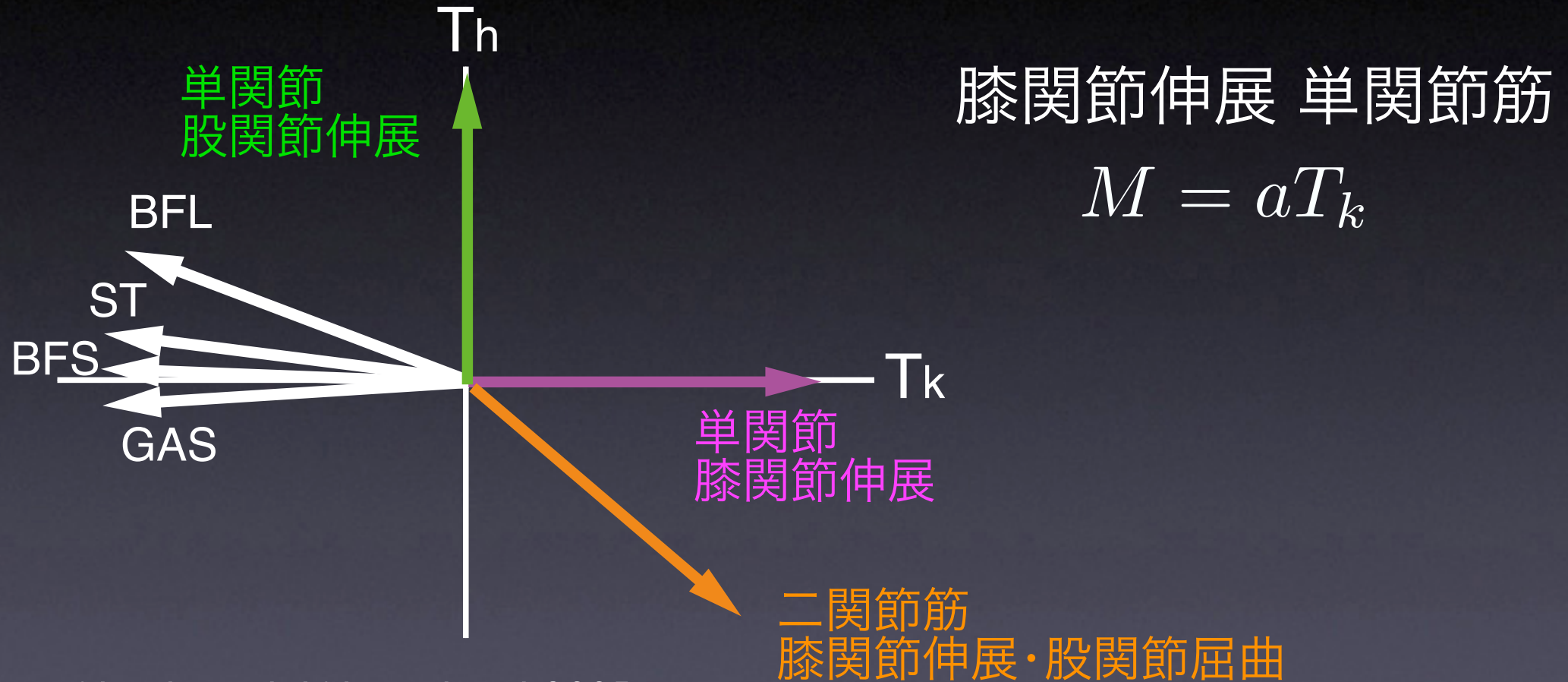


$$M = \lfloor aT_k + bT_h \rfloor \\ = \mathbf{T} \cdot \mathbf{P}$$

$$M = \lfloor |\mathbf{T}| |\mathbf{P}| \cos(\theta - \phi) \rfloor$$

コサインチューニング

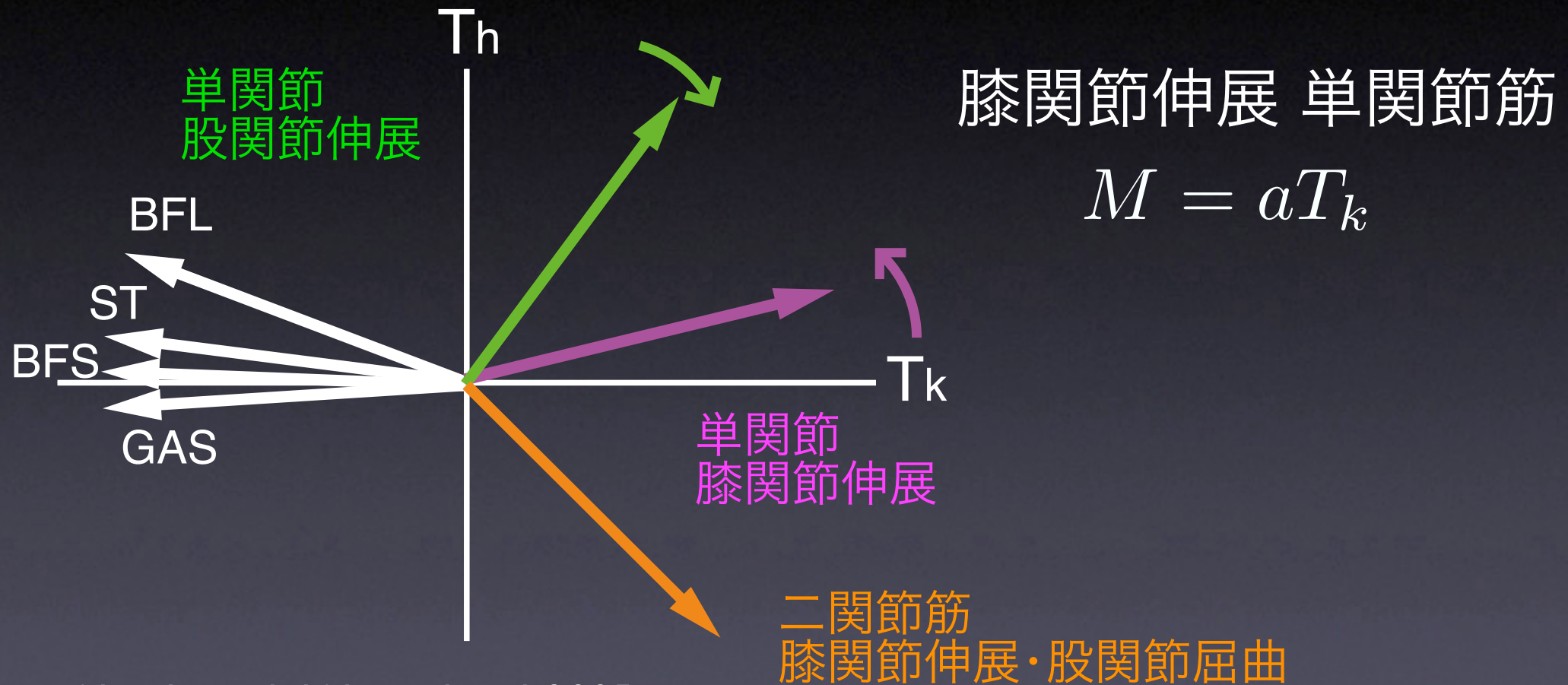
単純、しかし反直感的



Nozaki et al., J Neurophysiol, 2005

単純、しかし反直感的

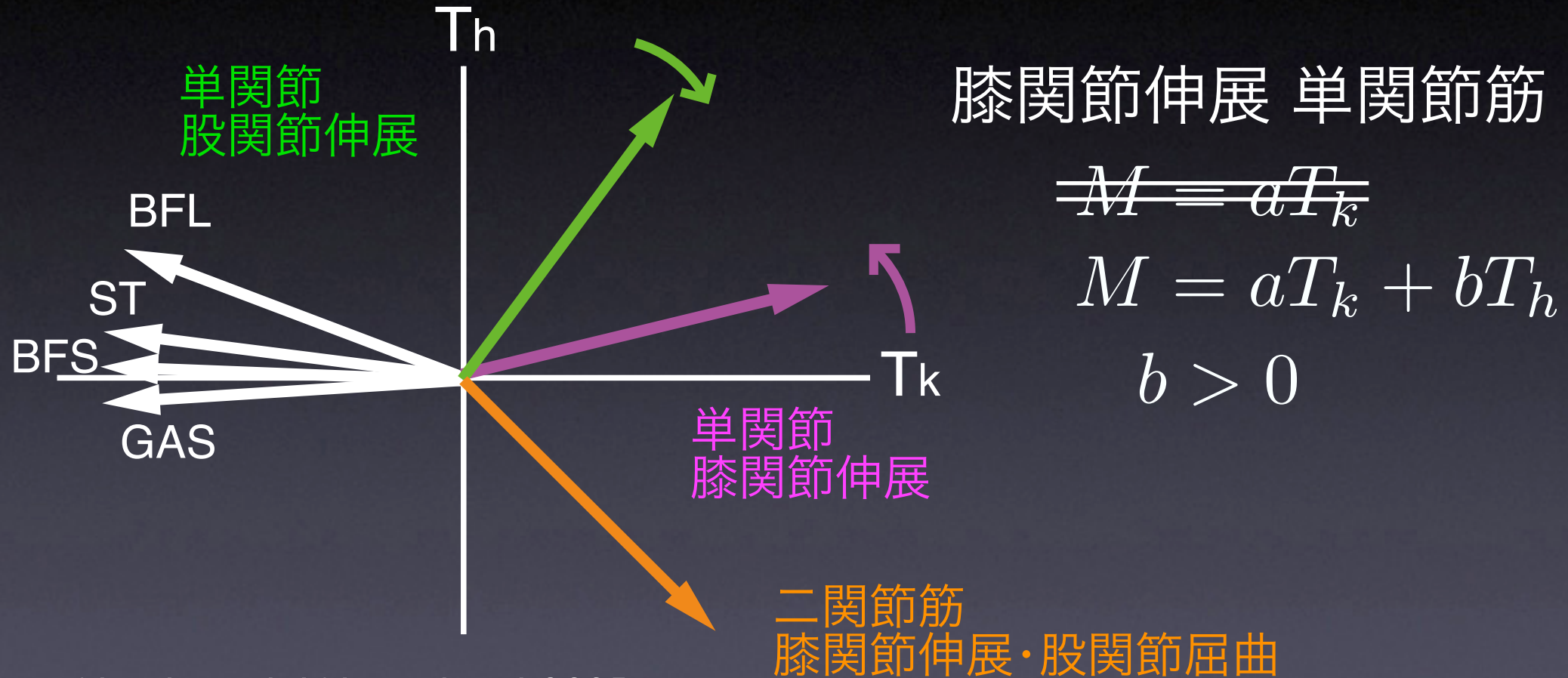
至適方位(PTD)



Nozaki et al., J Neurophysiol, 2005

単純、しかし反直感的

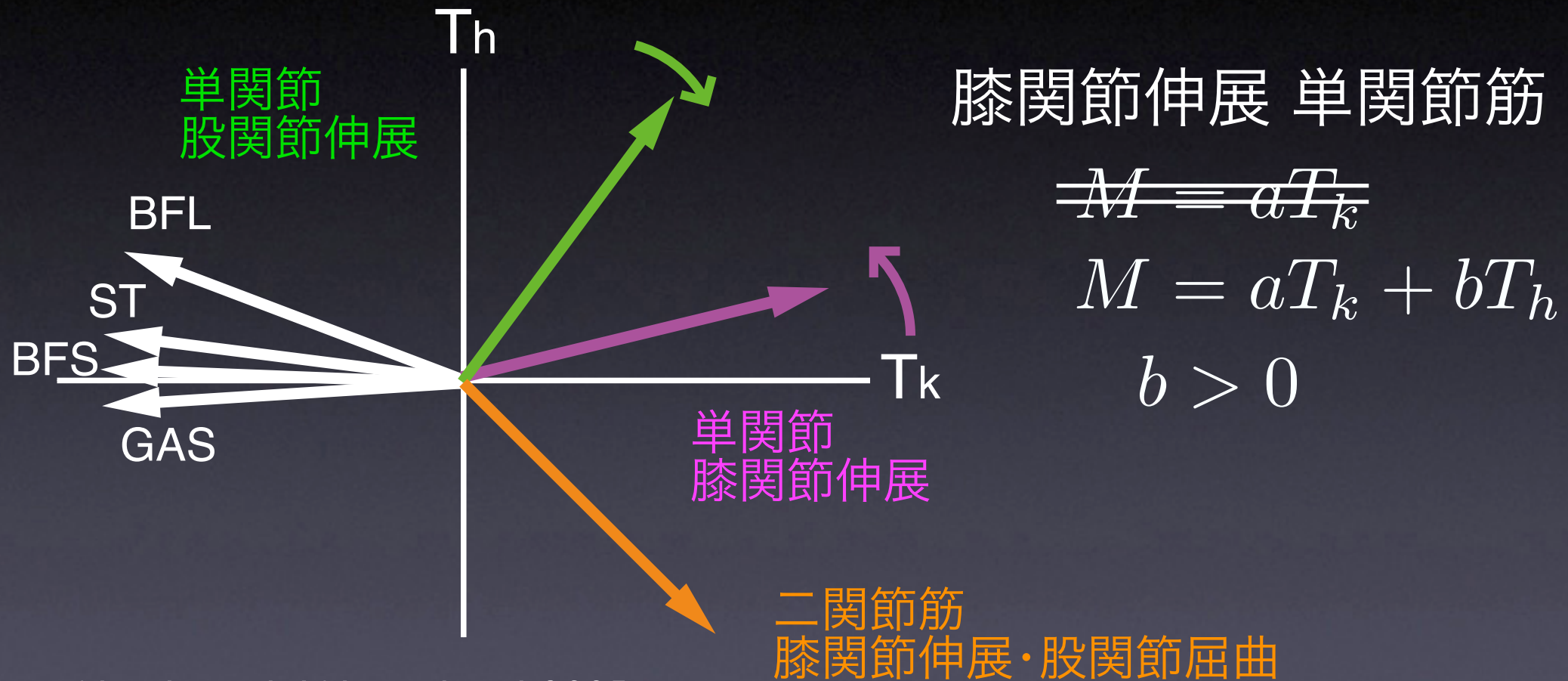
至適方位(PTD)



Nozaki et al., J Neurophysiol, 2005

単純、しかし反直感的

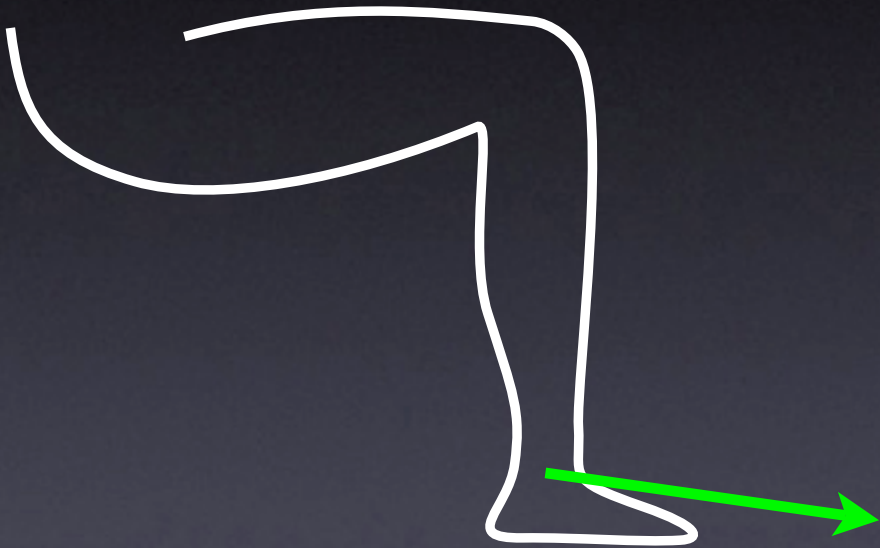
至適方位(PTD)



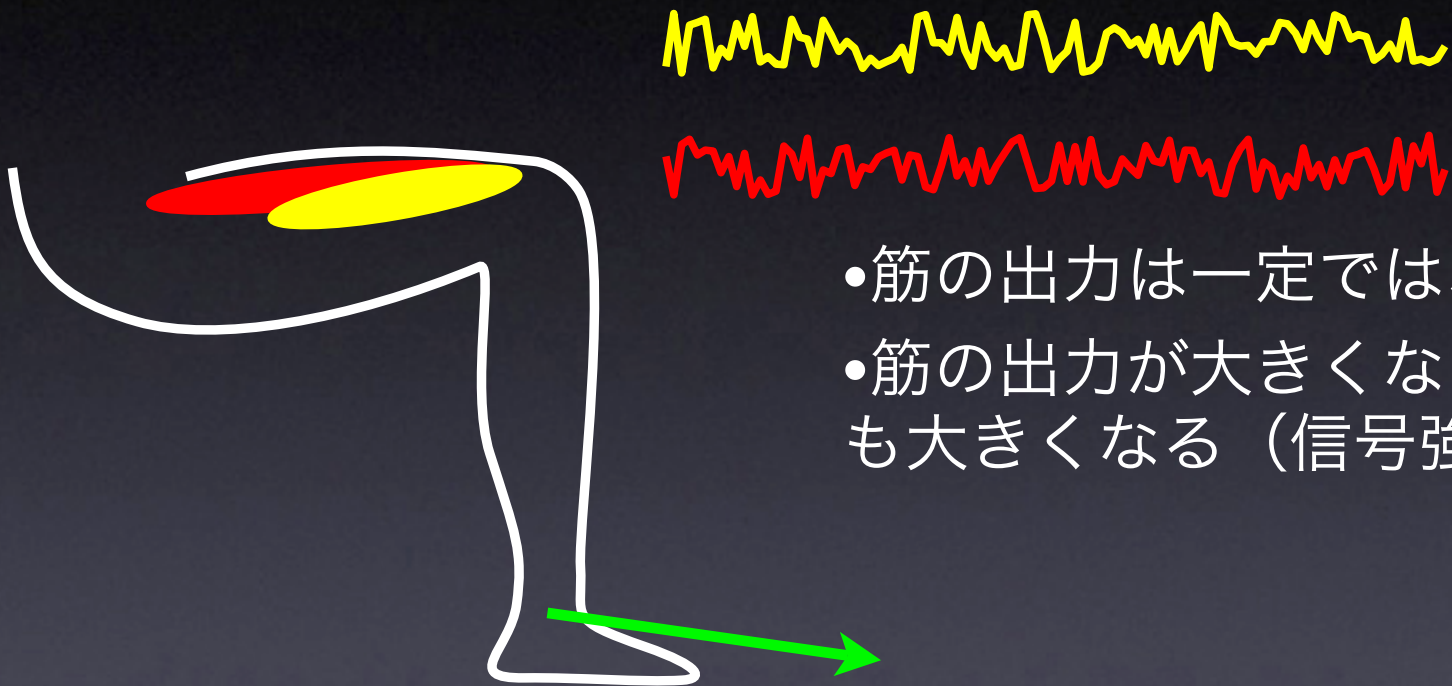
Nozaki et al., J Neurophysiol, 2005

単関節筋：隣の関節の発揮トルクに依存

筋出力の変動



筋出力の変動

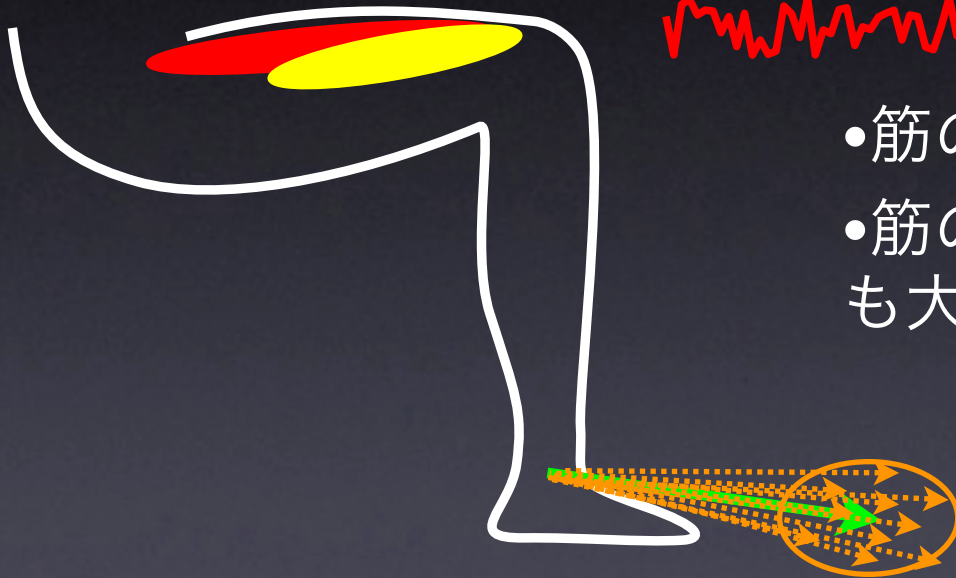


- 筋の出力は一定ではなく、変動する。
- 筋の出力が大きくなるほど変動の度合いも大きくなる（信号強度依存性ノイズ）。

筋出力の変動

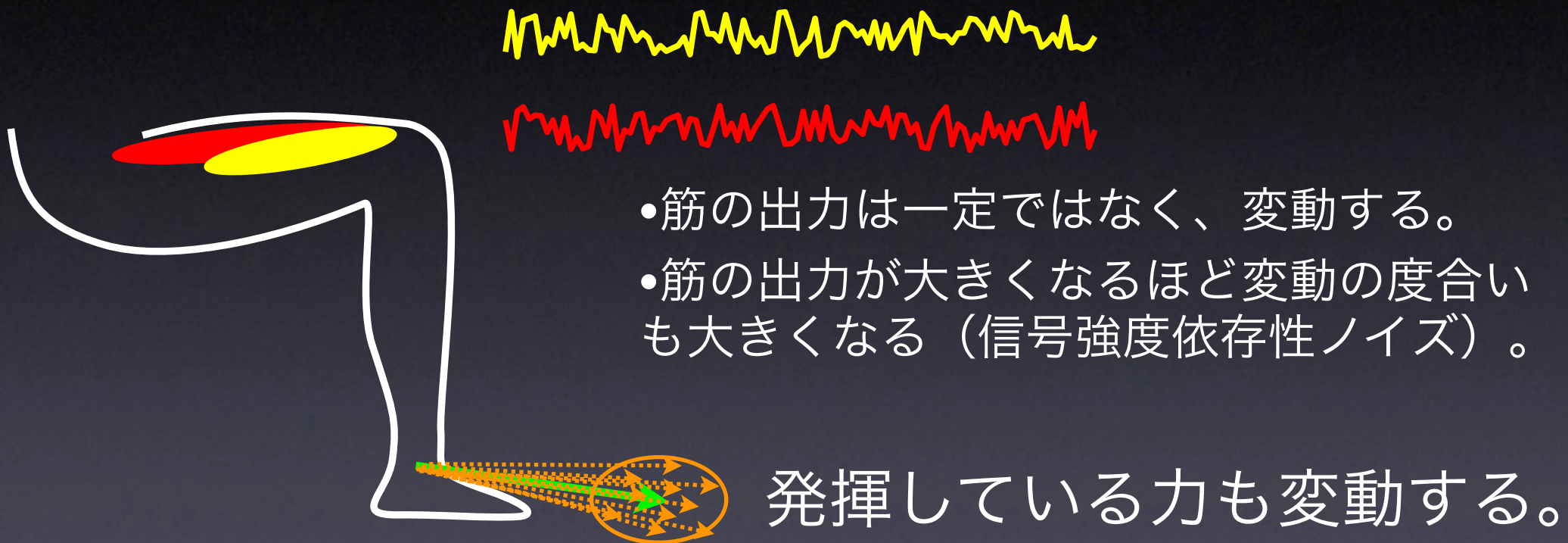


- 筋の出力は一定ではなく、変動する。
- 筋の出力が大きくなるほど変動の度合いも大きくなる（信号強度依存性ノイズ）。



発揮している力も変動する。

筋出力の変動



力のバラツキ
(分散) 最小



各筋出力の二
乗和最小

最適解：コサインチューニング

筋の活動度

$$\begin{aligned} k_i = & \left[\cos \mu_i \sum_{i=1}^N (g_i \sin \mu_i)^2 - \sin \mu_i \sum_{i=1}^N (g_i^2 \sin \mu_i \cos \mu_i) \right] T_k \\ & + \left[-\cos \mu_i \sum_{i=1}^N (g_i^2 \sin \mu_i \cos \mu_i) + \sin \mu_i \sum_{i=1}^N (g_i \cos \mu_i)^2 \right] T_h. \end{aligned}$$

最適解：コサインチューニング

筋の活動度

$$\begin{aligned} k_i = & \left[\cos \mu_i \sum_{i=1}^N (g_i \sin \mu_i)^2 - \sin \mu_i \sum_{i=1}^N (g_i^2 \sin \mu_i \cos \mu_i) \right] T_k \\ & + \left[-\cos \mu_i \sum_{i=1}^N (g_i^2 \sin \mu_i \cos \mu_i) + \sin \mu_i \sum_{i=1}^N (g_i \cos \mu_i)^2 \right] T_h. \end{aligned}$$

筋の活動度は関節トルクの線形和

至適方向の回転

$$\mathbf{p}_i^T = \frac{\mathbf{\Lambda} \mathbf{e}_i^T}{|\mathbf{\Lambda} \mathbf{e}_i^T|} \quad \mathbf{e}_i \text{ から } \mathbf{p}_i \text{ の写像}$$

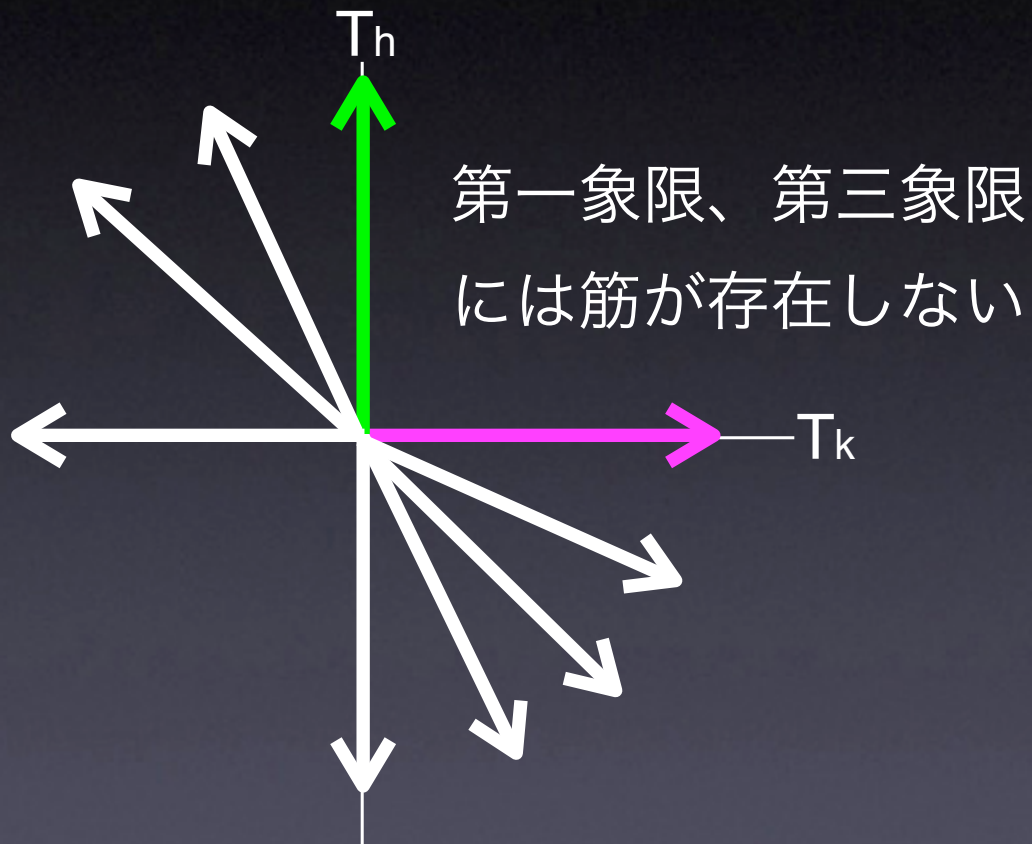
$\mathbf{p}_i$ 至適方向：筋活動度がもっとも大きくなる方向

$\mathbf{e}_i = (\cos \mu_i, \sin \mu_i)$ 筋の機械的作用を表す方向

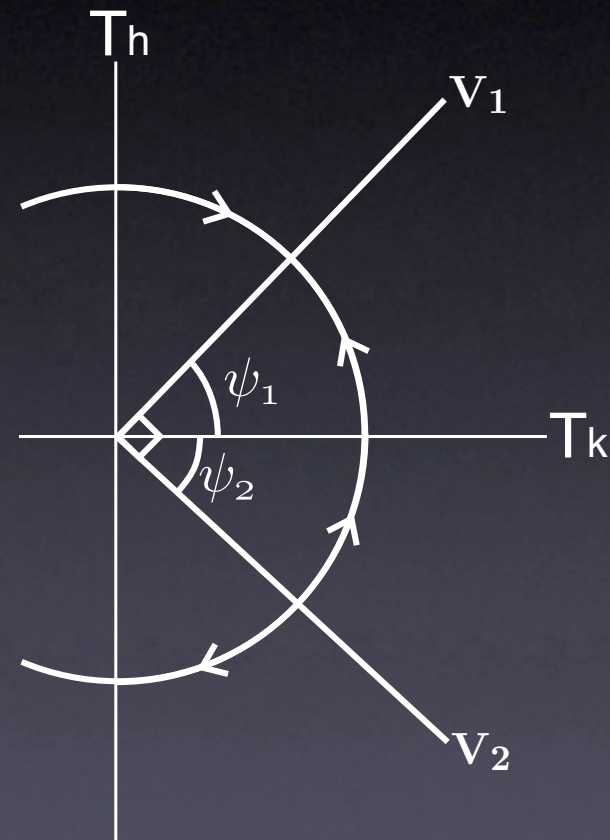
$$\mathbf{\Lambda} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N (g_i \sin \mu_i)^2 & -\sum_{i=1}^N (g_i^2 \sin \mu_i \cos \mu_i) \\ -\sum_{i=1}^N (g_i^2 \sin \mu_i \cos \mu_i) & \sum_{i=1}^N (g_i \cos \mu_i)^2 \end{pmatrix}.$$

至適方向の回転

$\mathbf{e}_i$ の分布



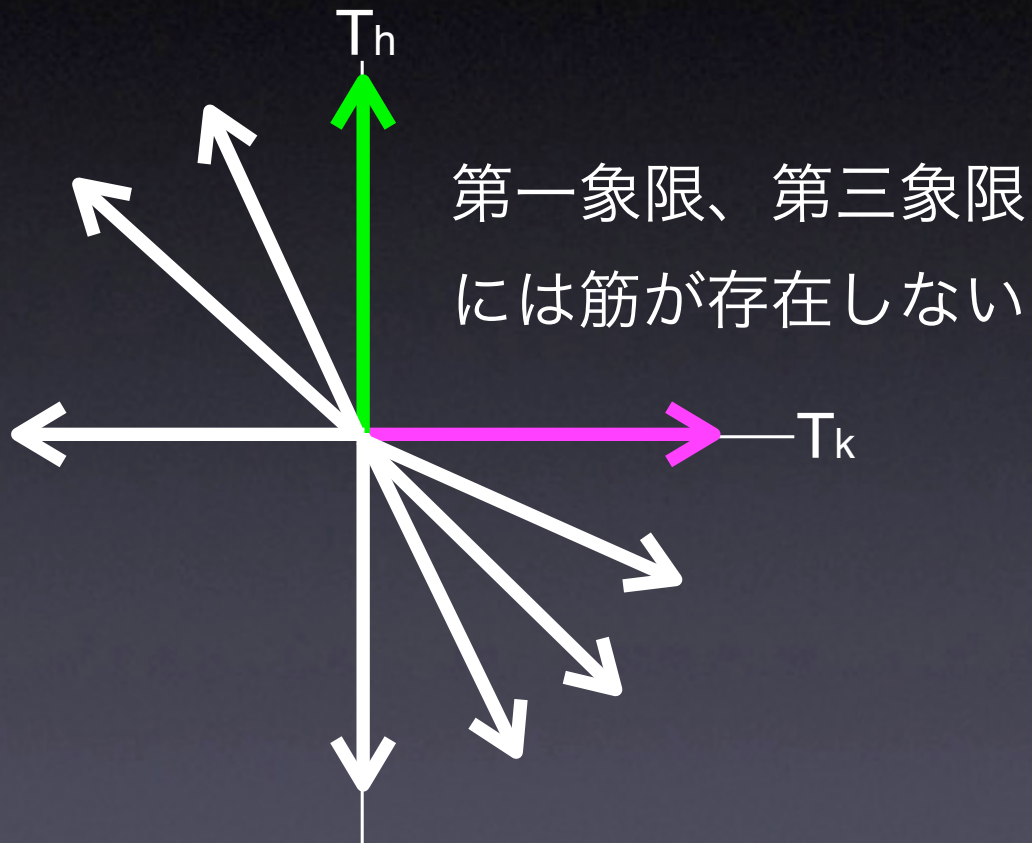
予想される回転



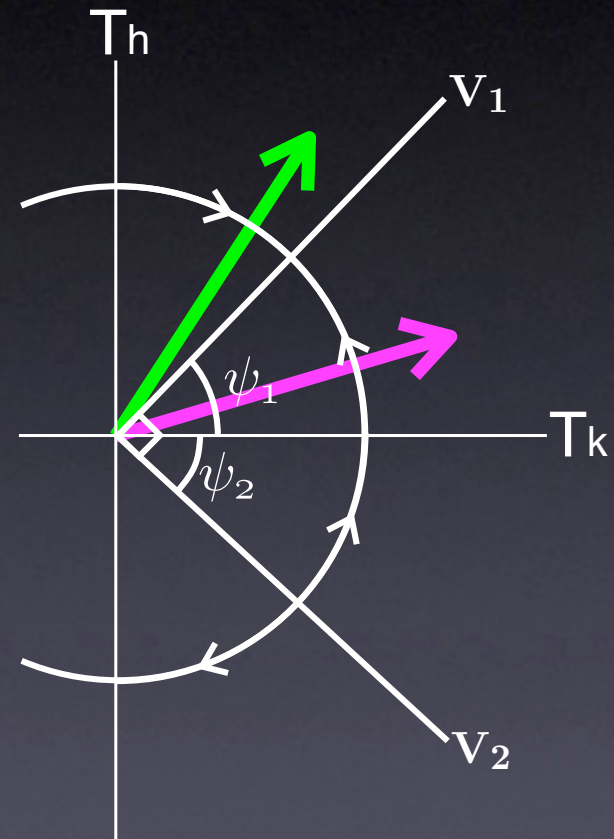
Nozaki et al., J Neurophysiol, 2005

至適方向の回転

$\mathbf{e}_i$ の分布



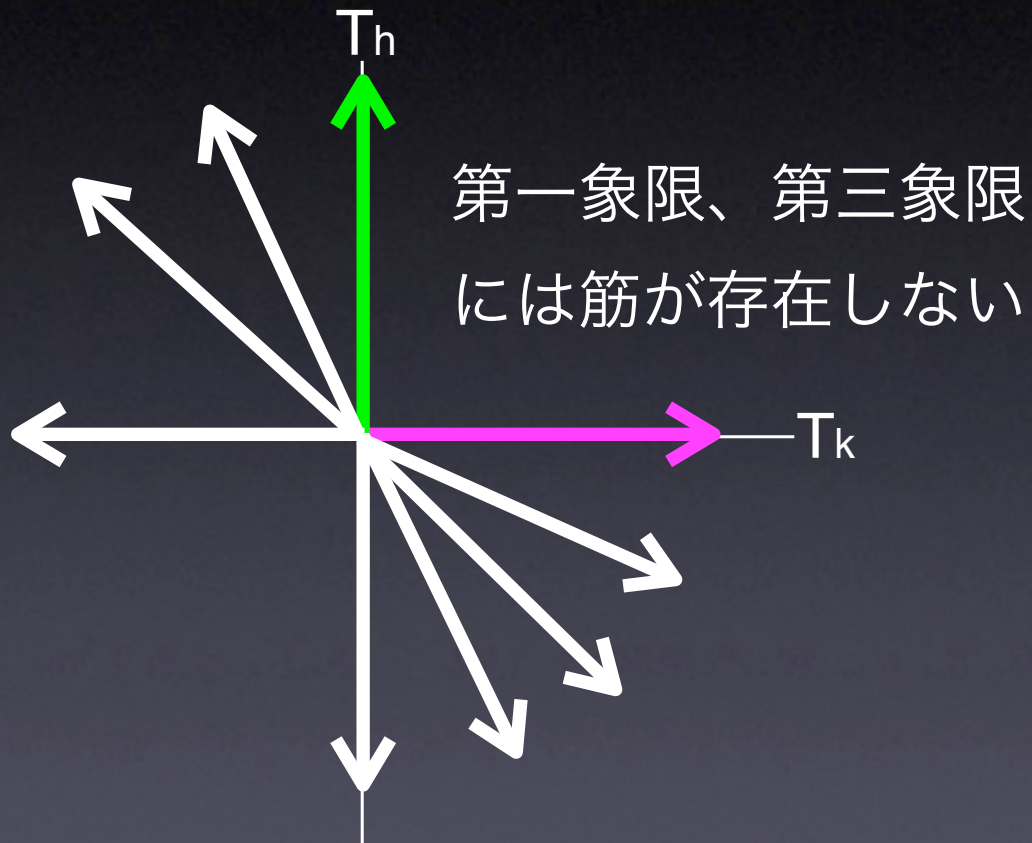
予想される回転



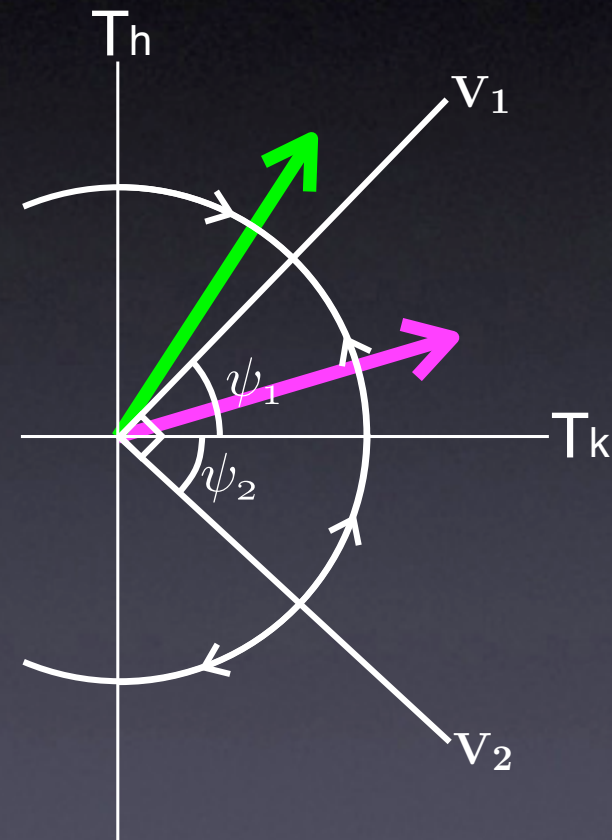
Nozaki et al., J Neurophysiol, 2005

至適方向の回転

$\mathbf{e}_i$ の分布



予想される回転



Nozaki et al., *J Neurophysiol*, 2005

力のバラツキを最小にする解は実験結果を再現

ここまでのまとめ

- 二関節筋があっても筋活動度の変調のされ方は単純（関節トルクの線形和）。
- 二関節筋があるために、単関節筋の活動度が、一見無関係な隣接関節のトルクの影響を受ける（至適方向の回転）。
- 発揮される力のバラツキが最小になるように各筋の活動度が調節された結果かもしれない。

概念の応用

- 筋力トレーニング

より効率的なトレーニングを求めて

- 運動制御（直立姿勢制御）

姿勢維持筋とは何か？

概念の応用

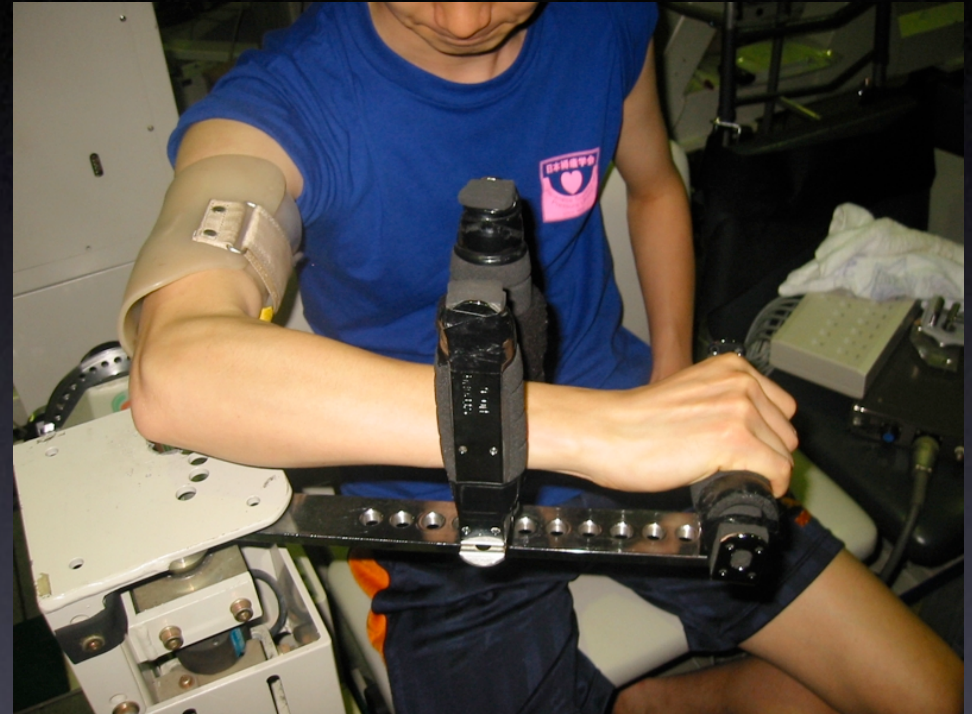
- 筋力トレーニング

より効率的なトレーニングを求めて

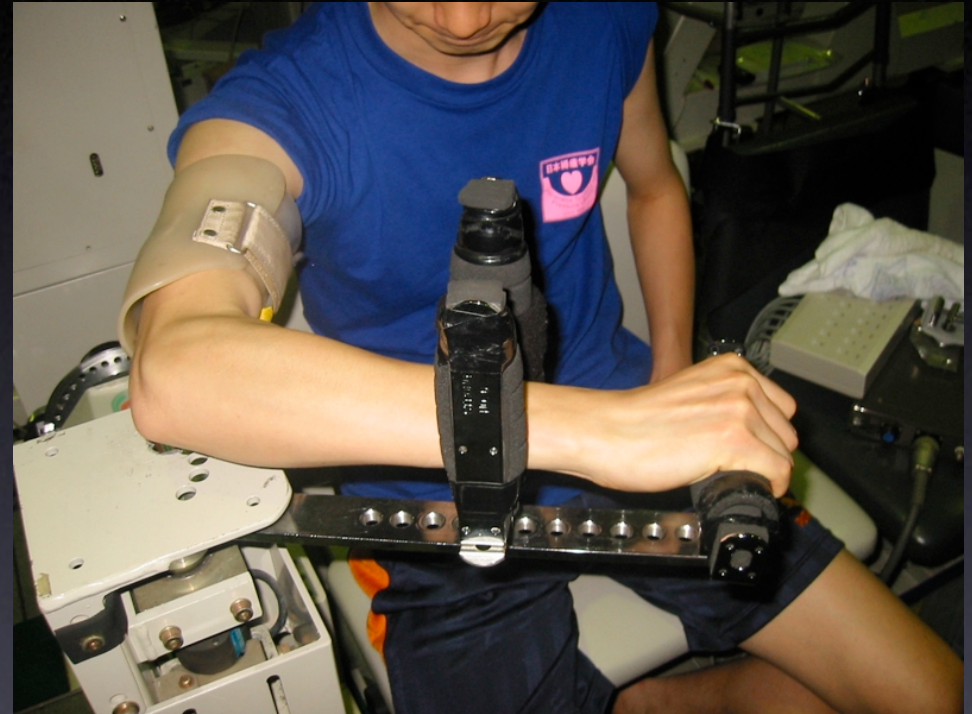
- 運動制御（直立姿勢制御）

姿勢維持筋とは何か？

単関節トルク発揮課題

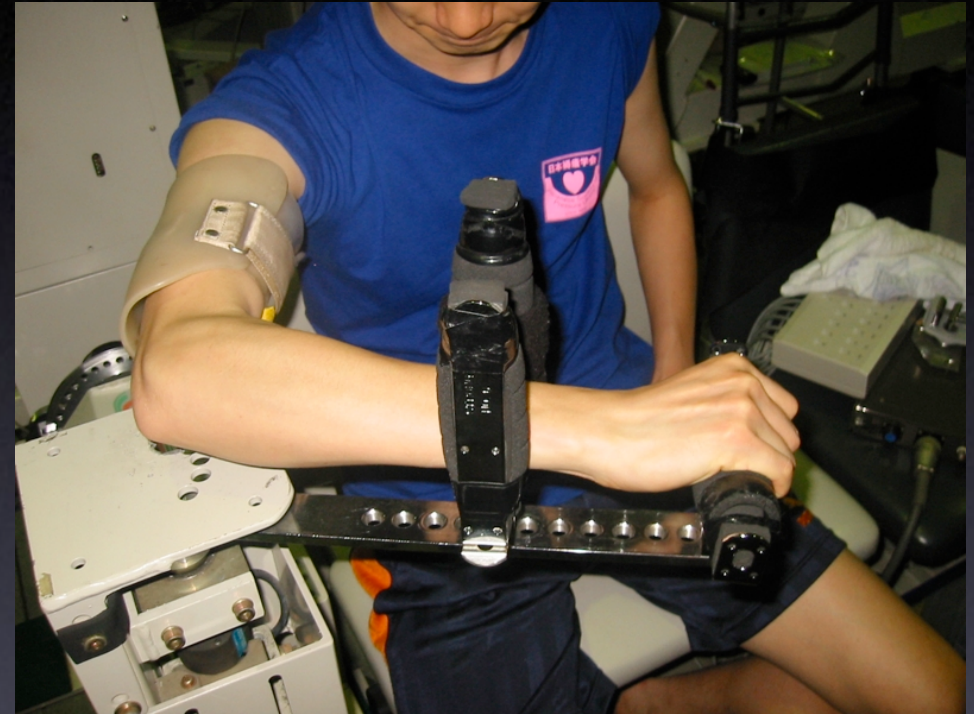


単関節トルク発揮課題



- スキル不要

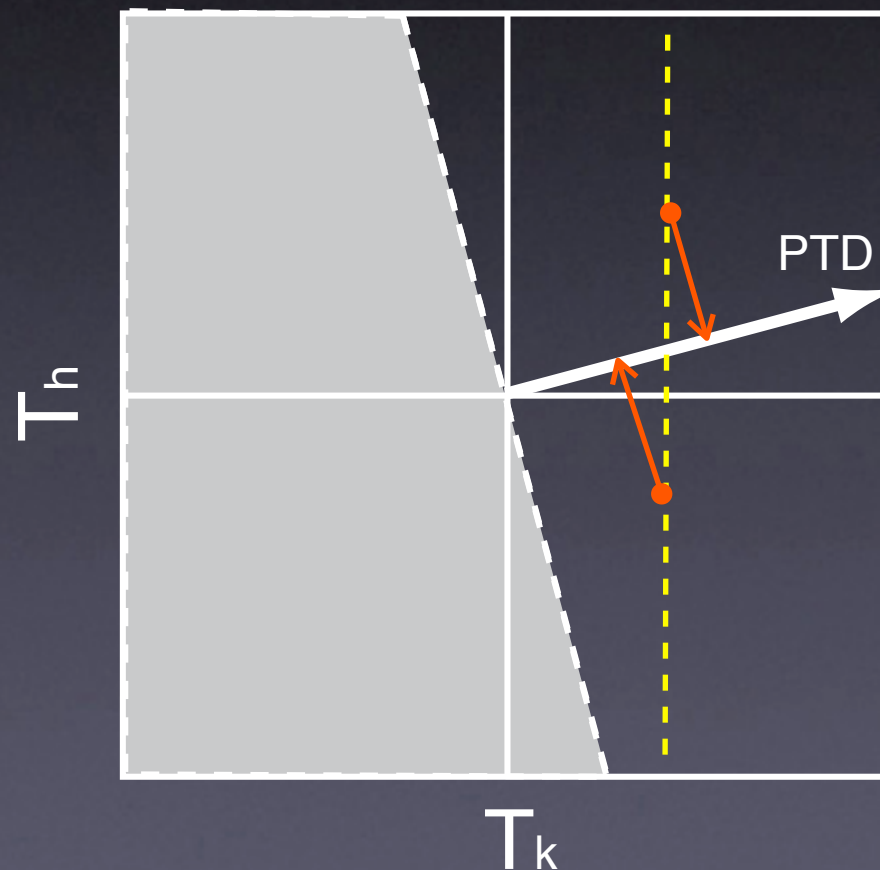
単関節トルク発揮課題

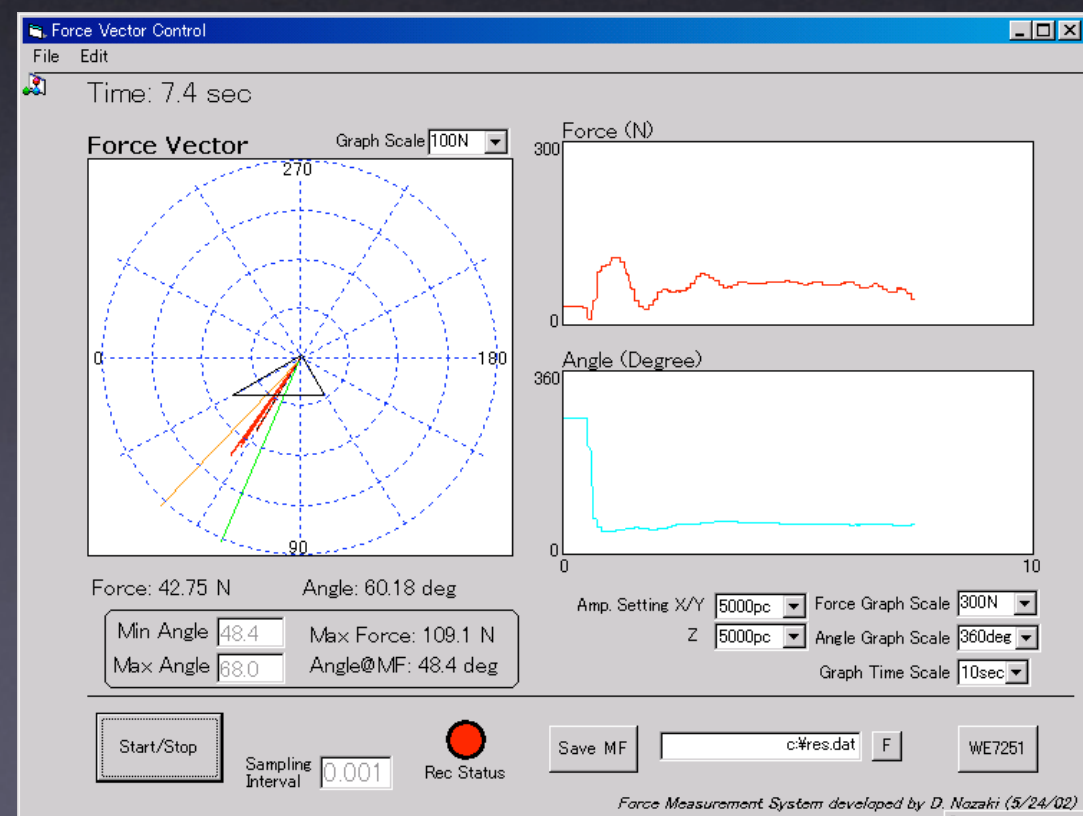
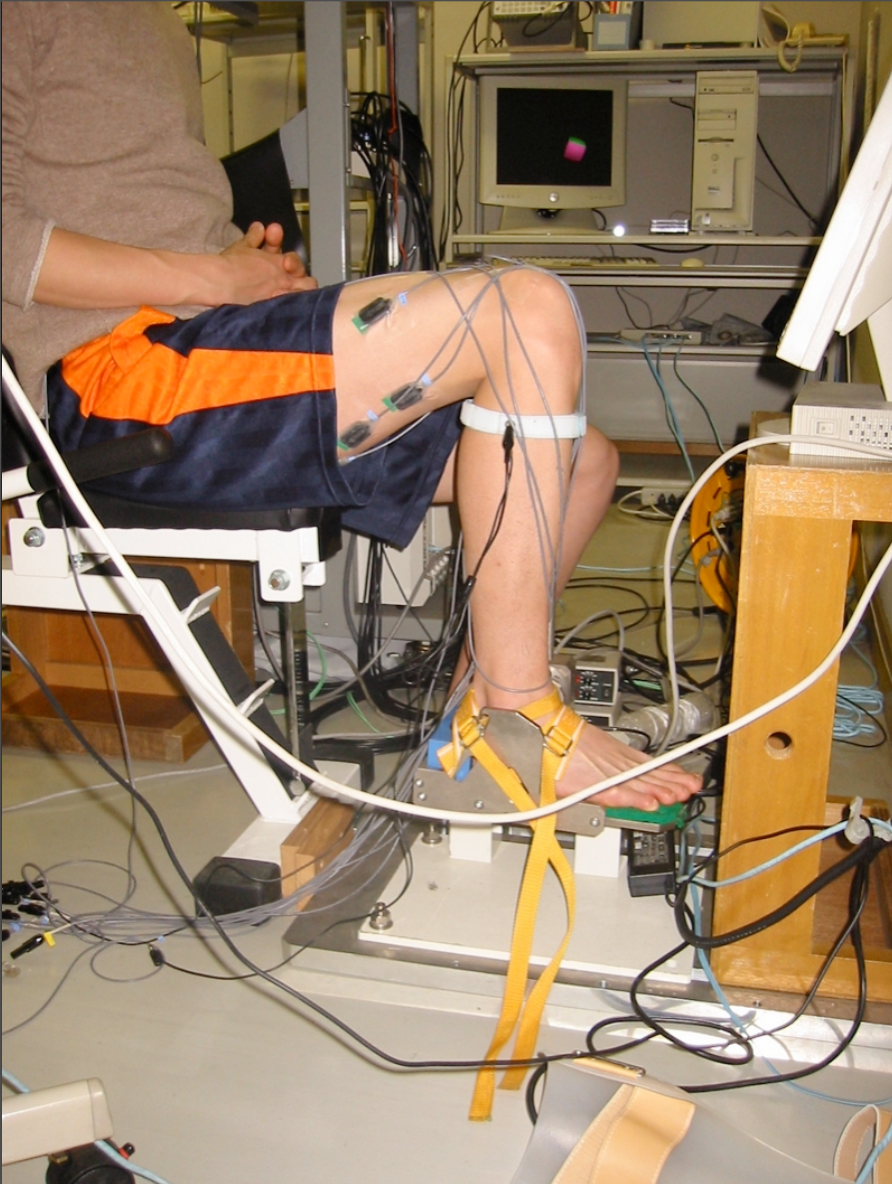


- スキル不要
- 筋を再現性よく活動させるには効率の良い方法

一方の関節トルクを規定しただけ では不十分

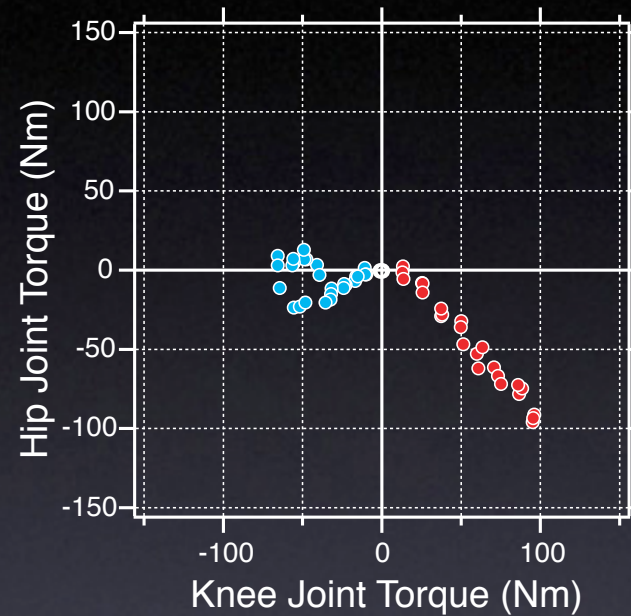
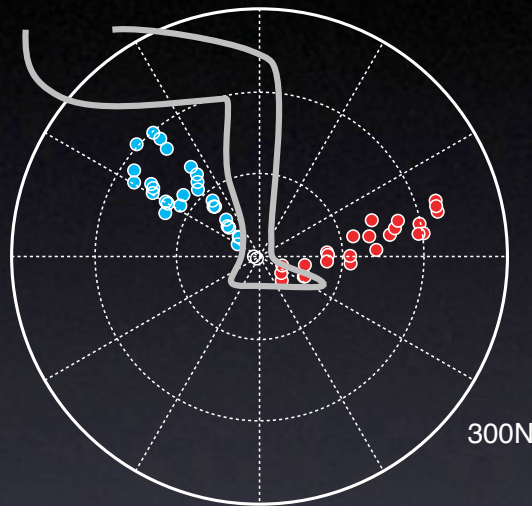
外側広筋（単関節筋：膝伸展）



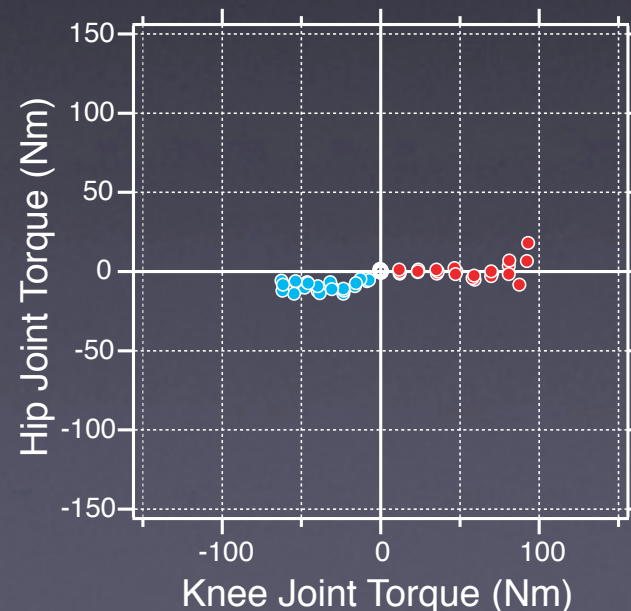
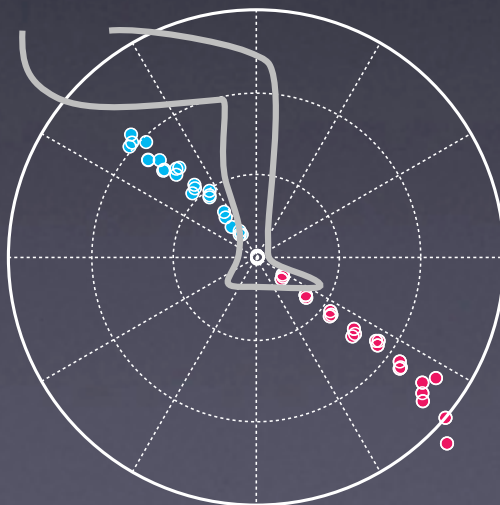


膝関節伸展課題における個人差

Subject A

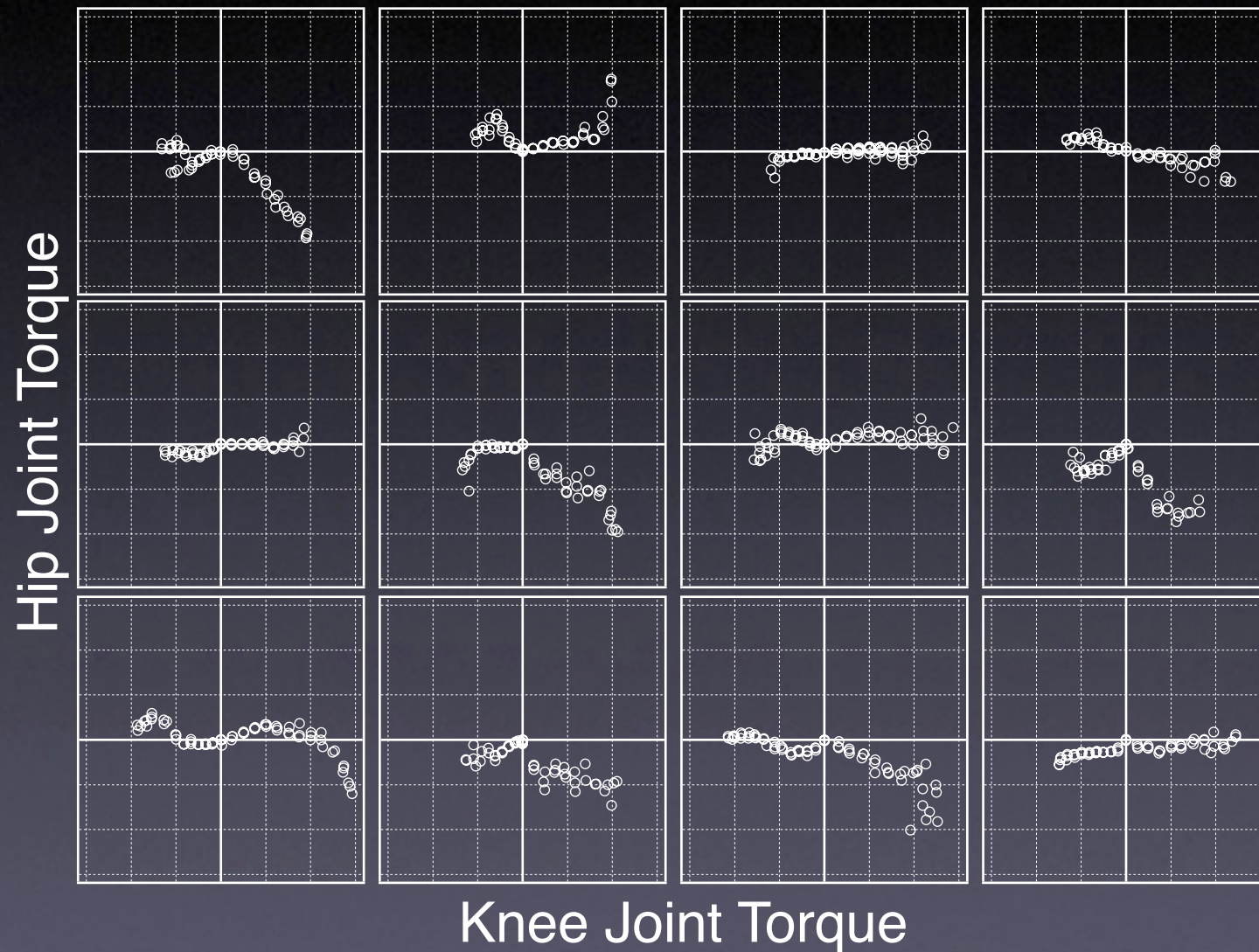


Subject B



- Knee Extension
- Knee Flexion

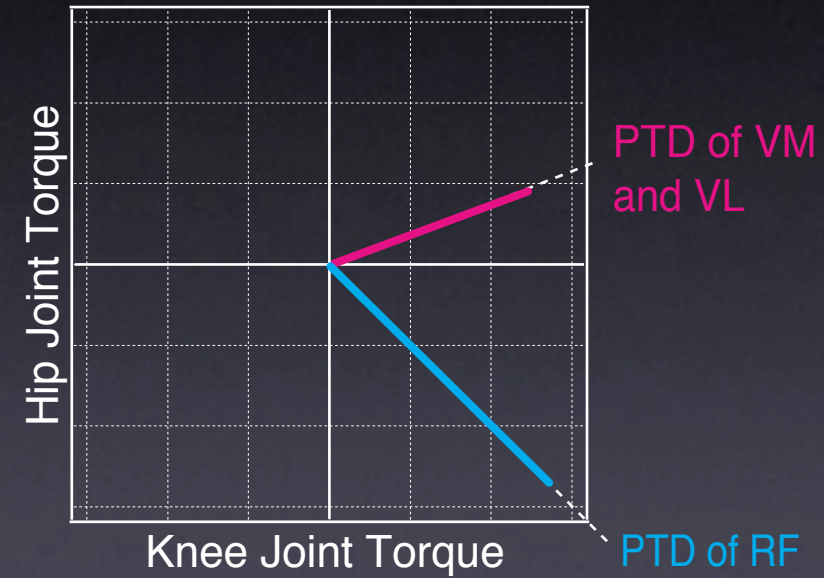
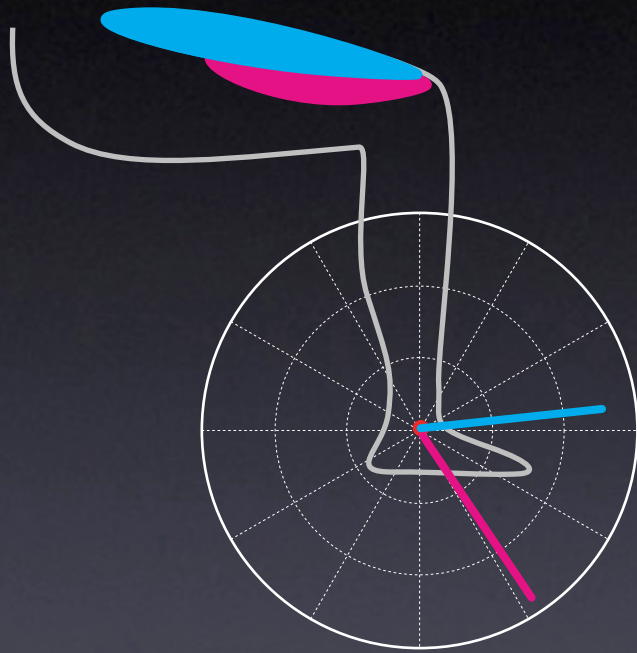
人によって様々なストラテジー



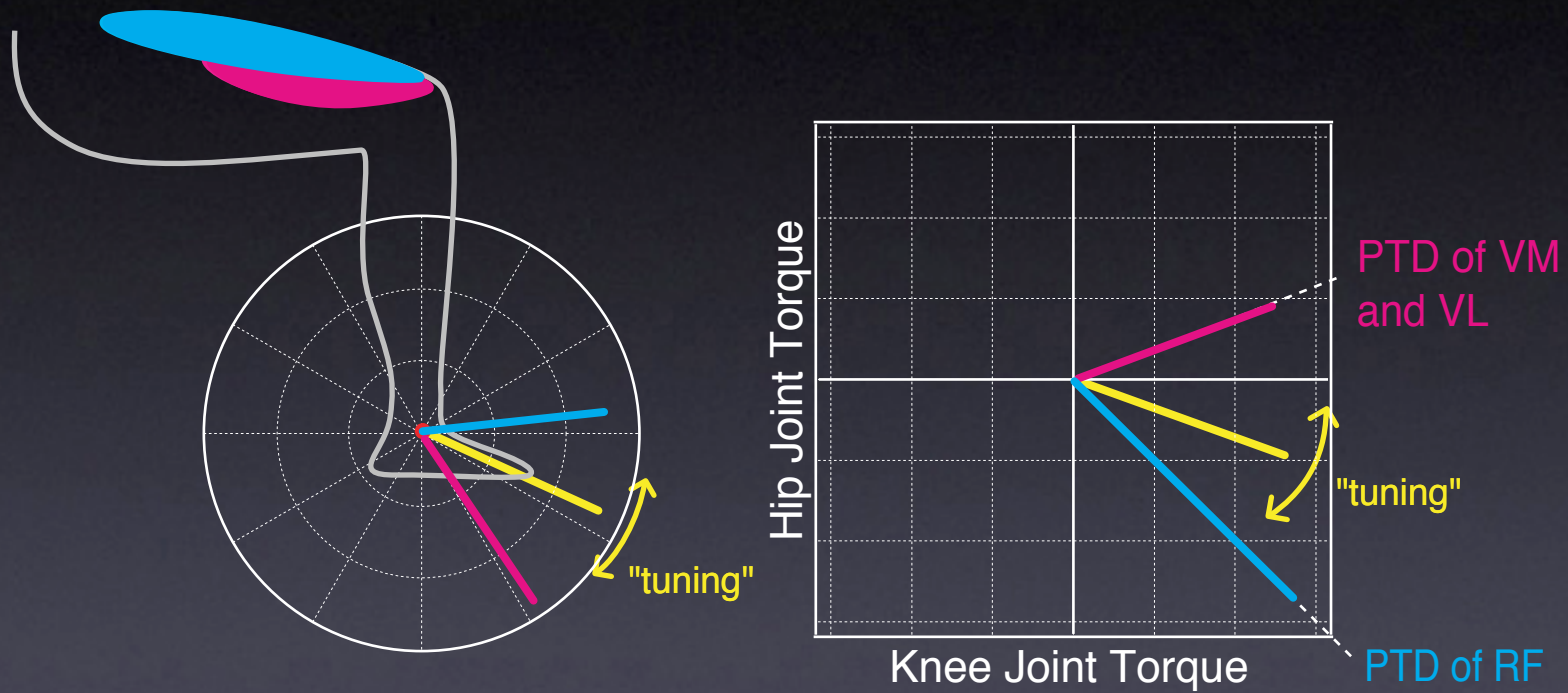
人によって様々なストラテジー



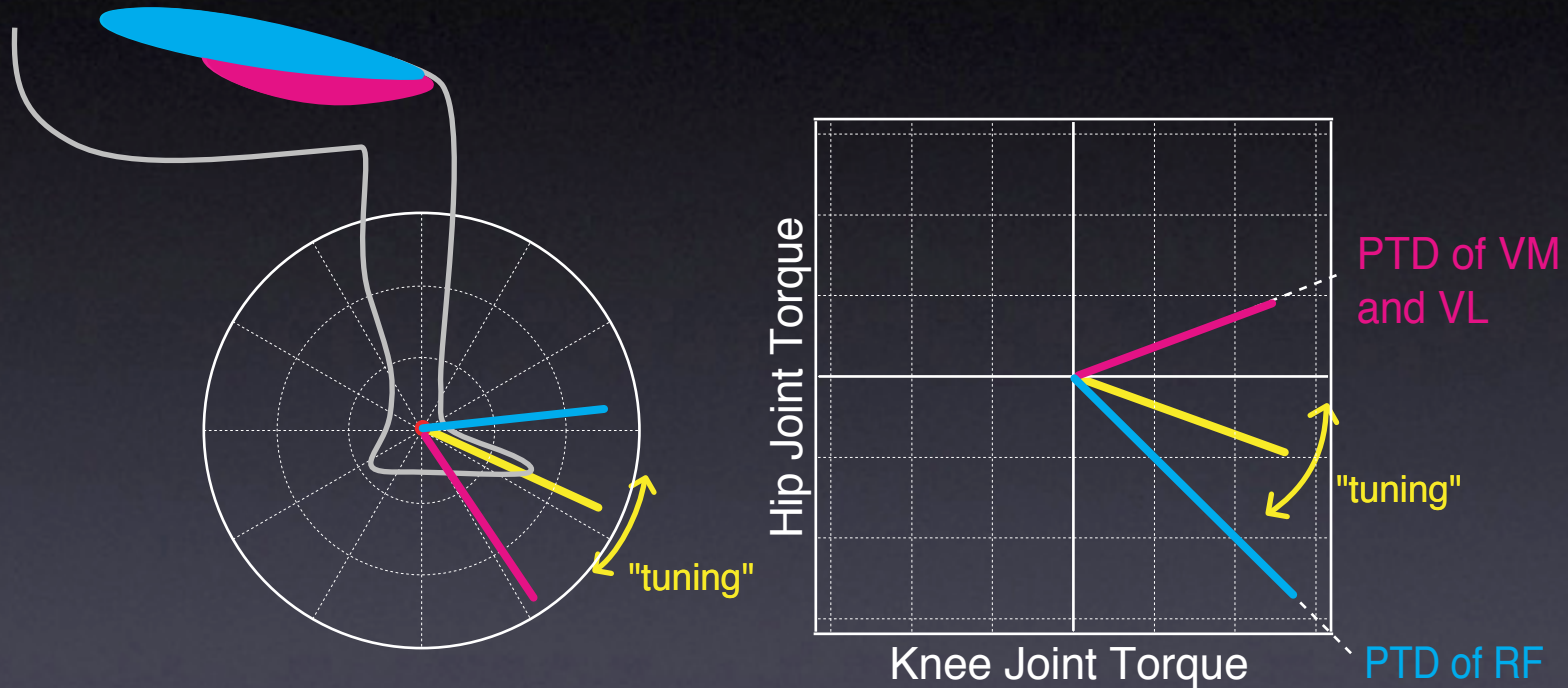
力方向のチューニング



力方向のチューニング



力方向のチューニング



力を出す方向のチューニングにより、筋を選択的に活動させることができる

概念の応用

- 筋力トレーニング

より効率的なトレーニングを求めて

- 運動制御（直立姿勢制御）

姿勢維持筋とは何か？

ヒト直立姿勢時の筋活動

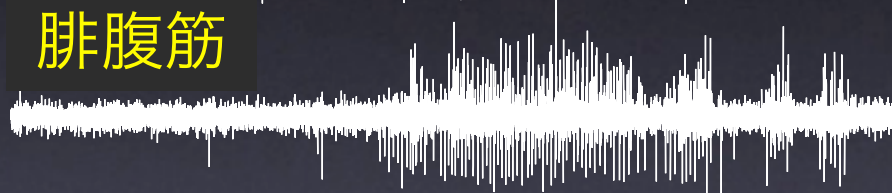


ヒラメ筋



緊張性

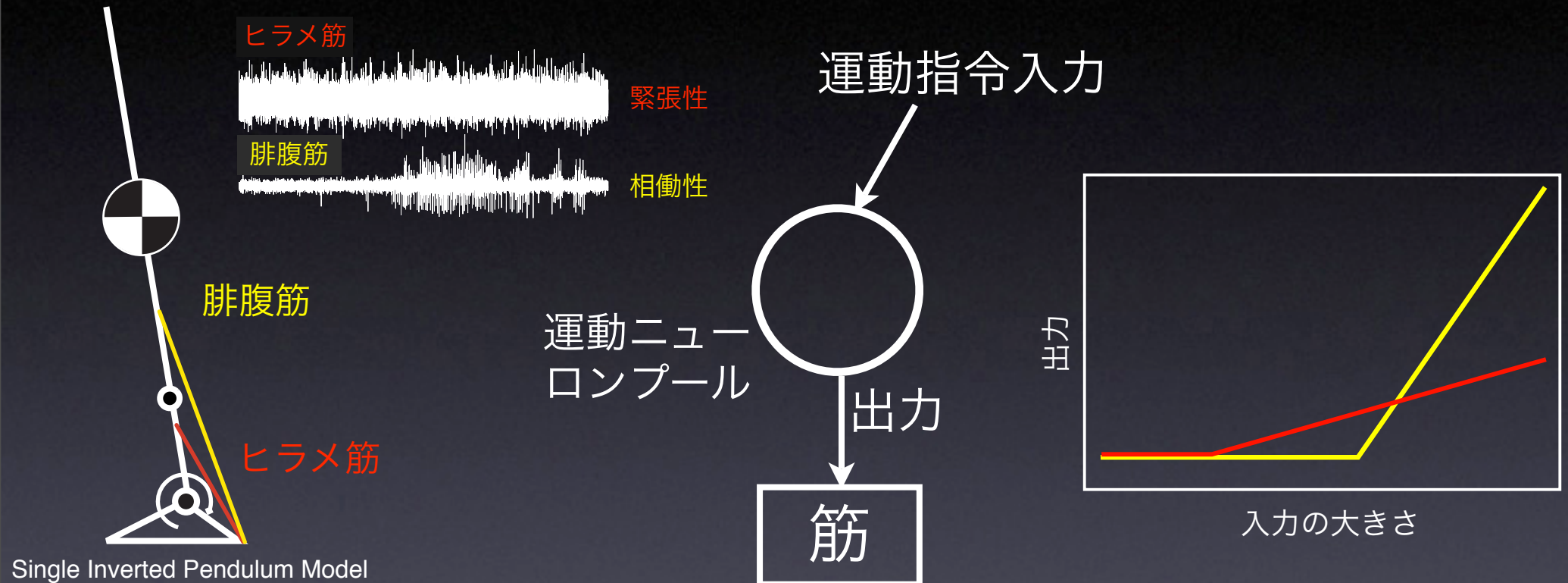
腓腹筋



相働性

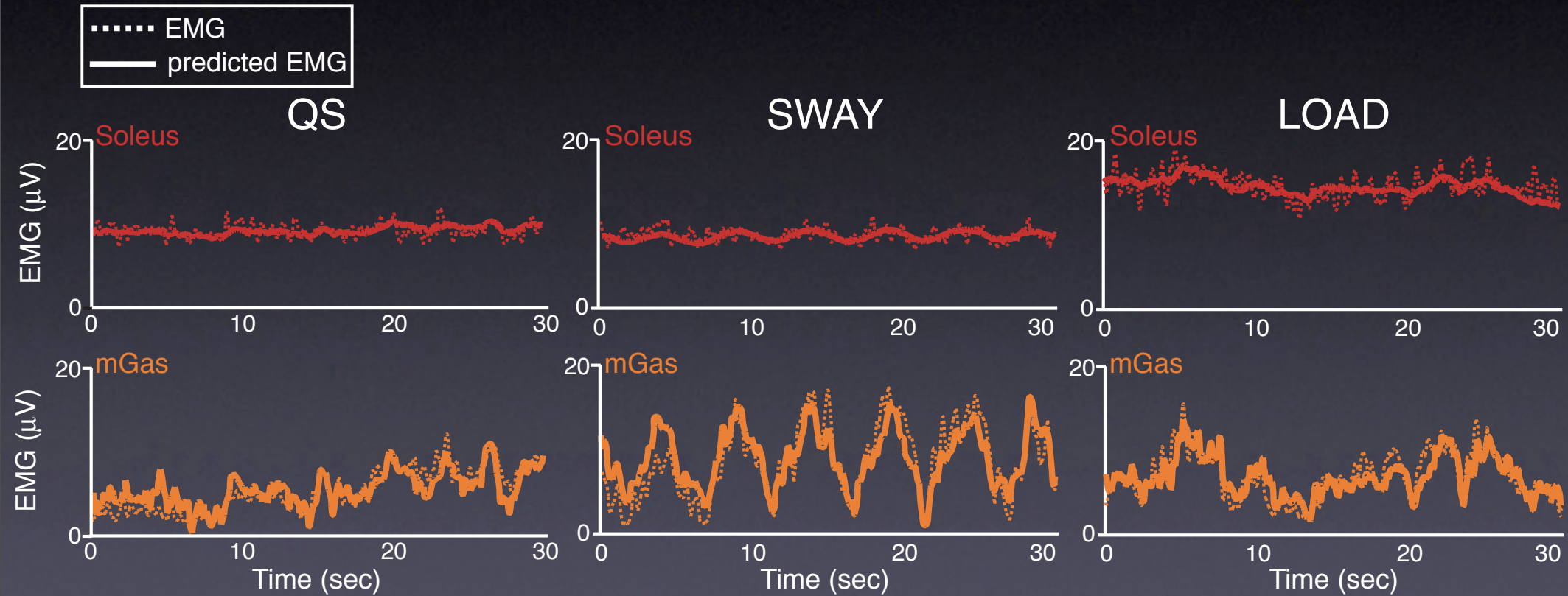
Single Inverted Pendulum Model

従来の説明



- 運動ニューロンプールの入出力特性の違い
- ヒラメ筋は遅筋線維（疲労に強い筋）、腓腹筋は速筋線維（強い力を出すが疲労しやすい筋）の割合が多い

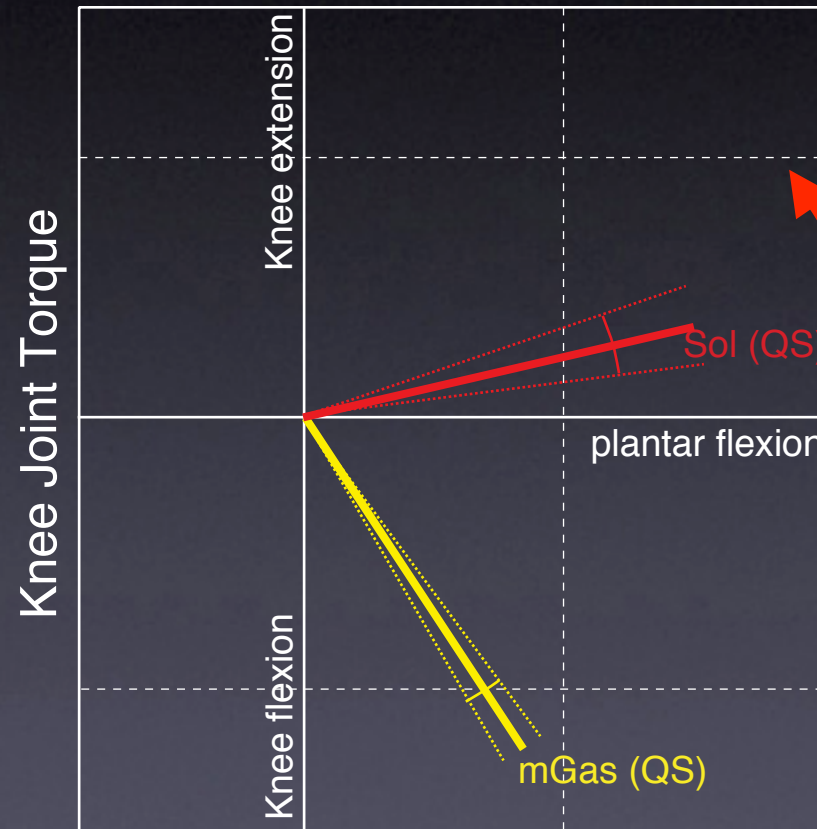
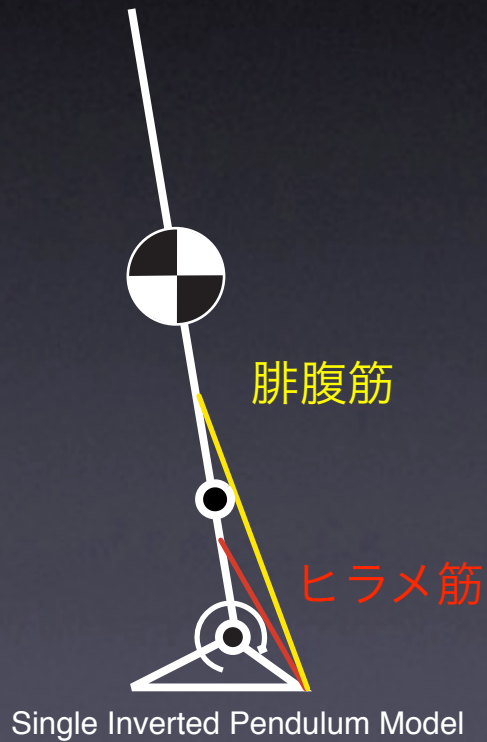
我々のモデルによる予測



モデルは実験データを再現

至適方向

膝関節トルク

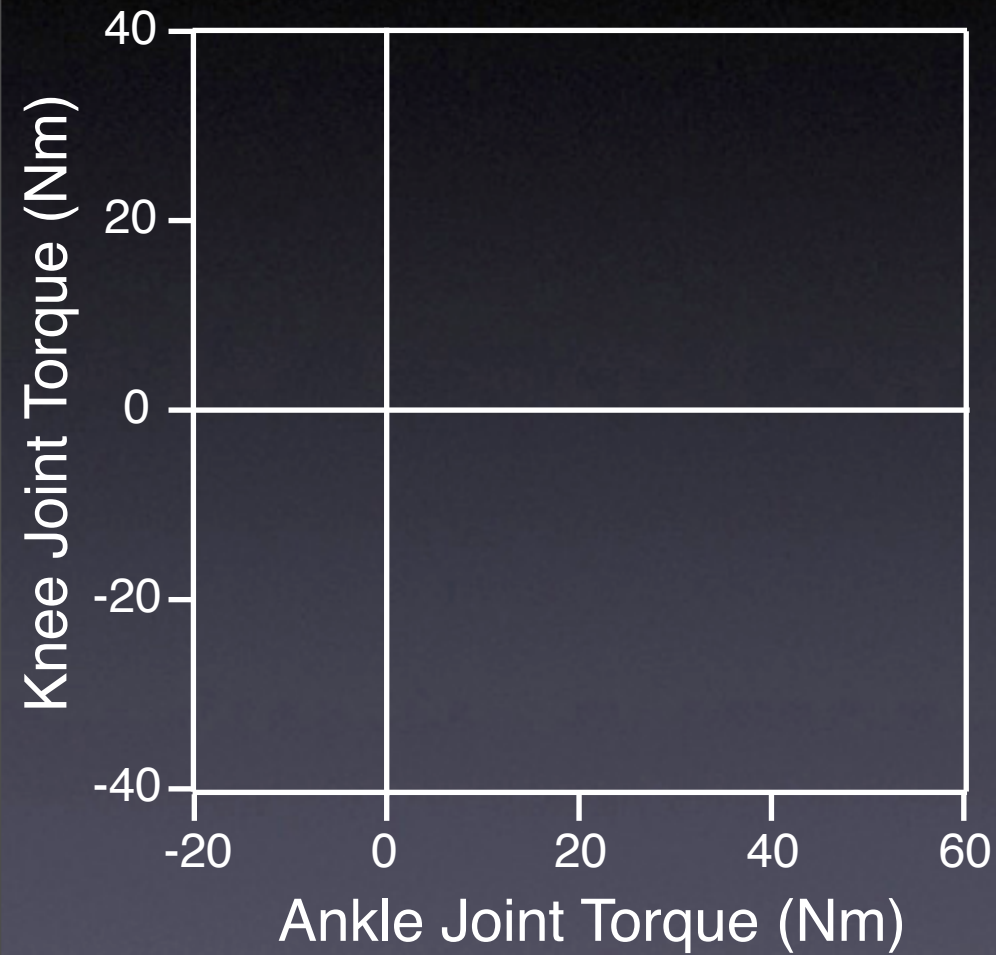


至適方向の回転

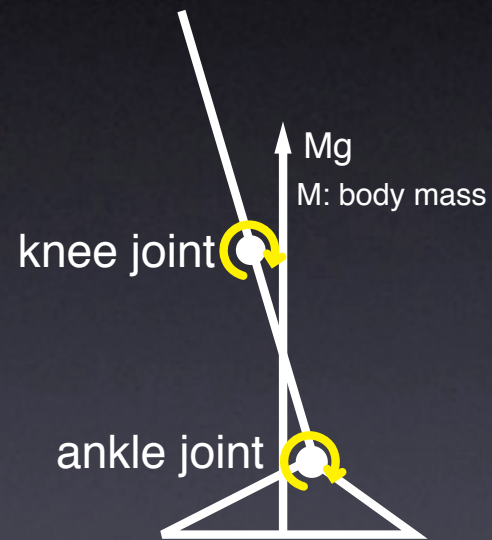
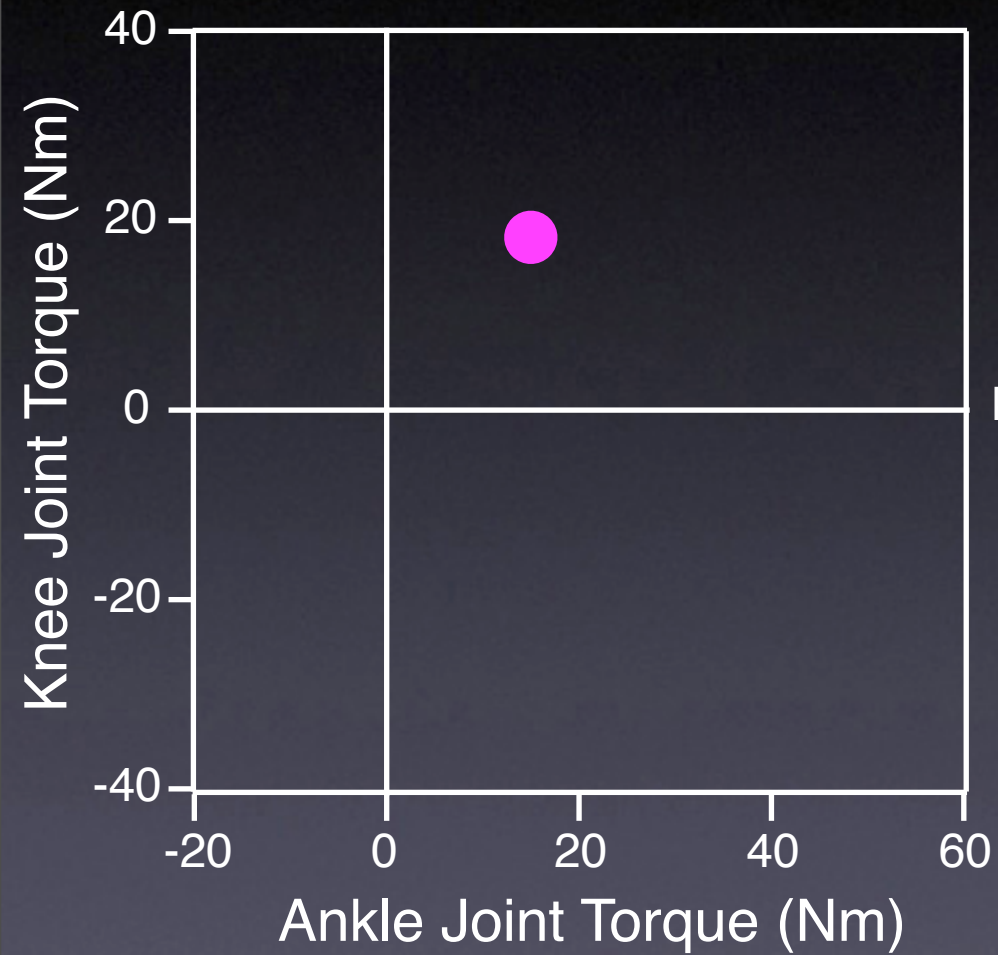
Ankle Joint Torque

足関節トルク

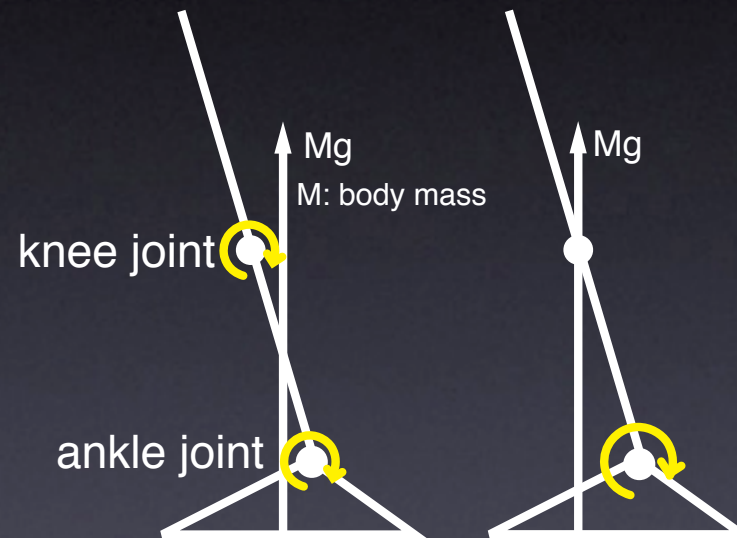
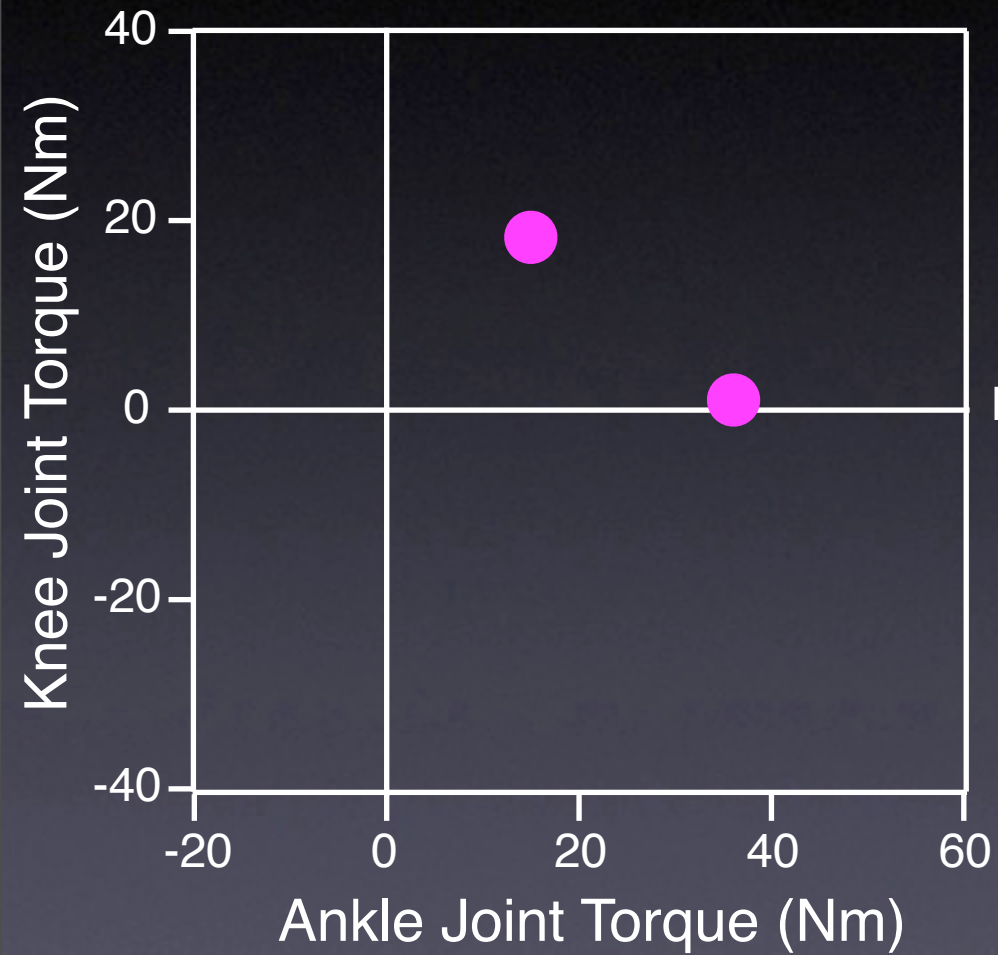
重力環境下で立つ



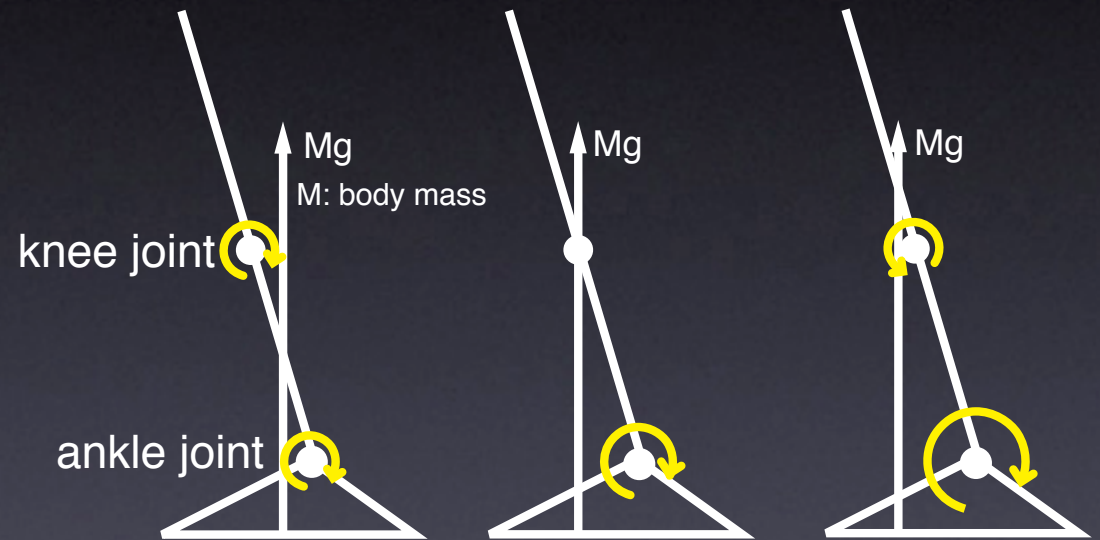
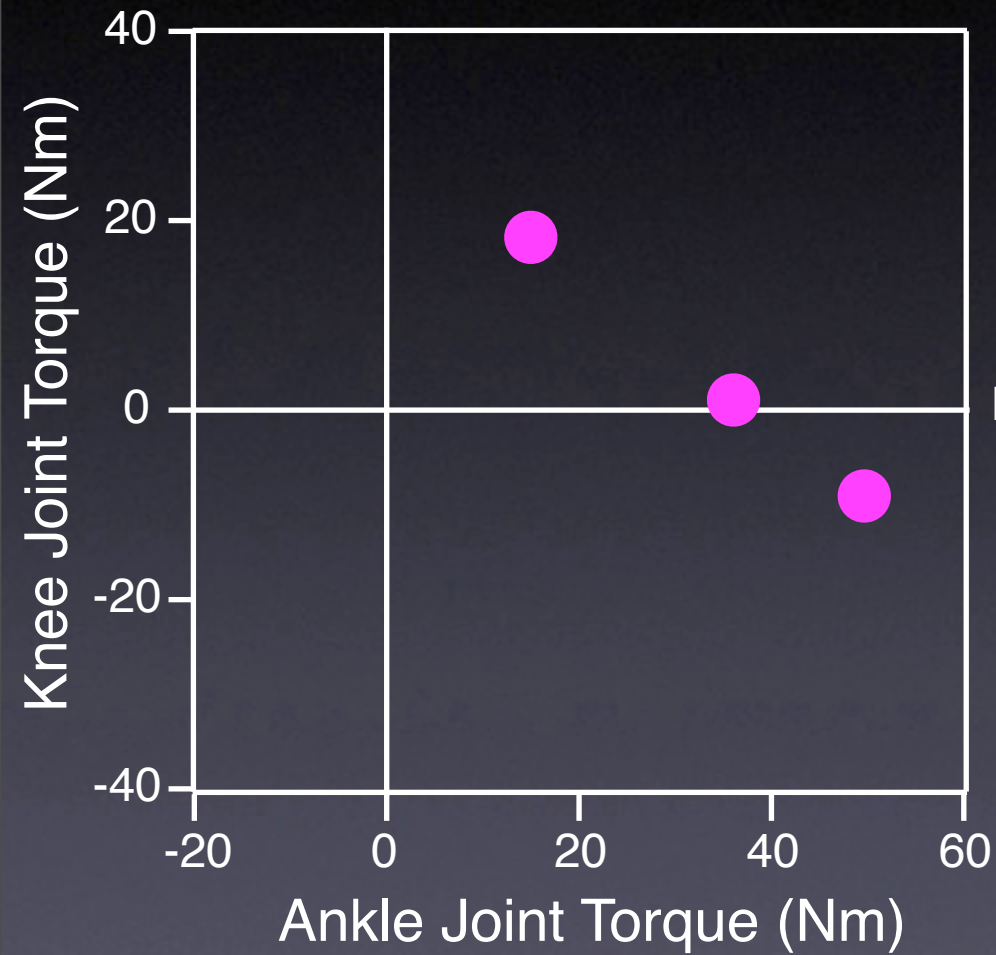
重力環境下で立つ



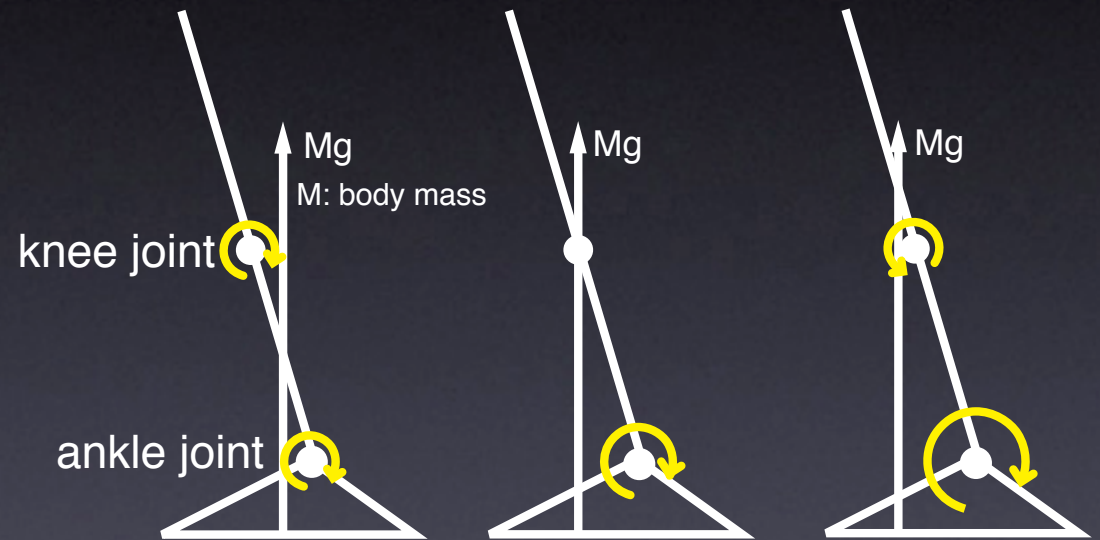
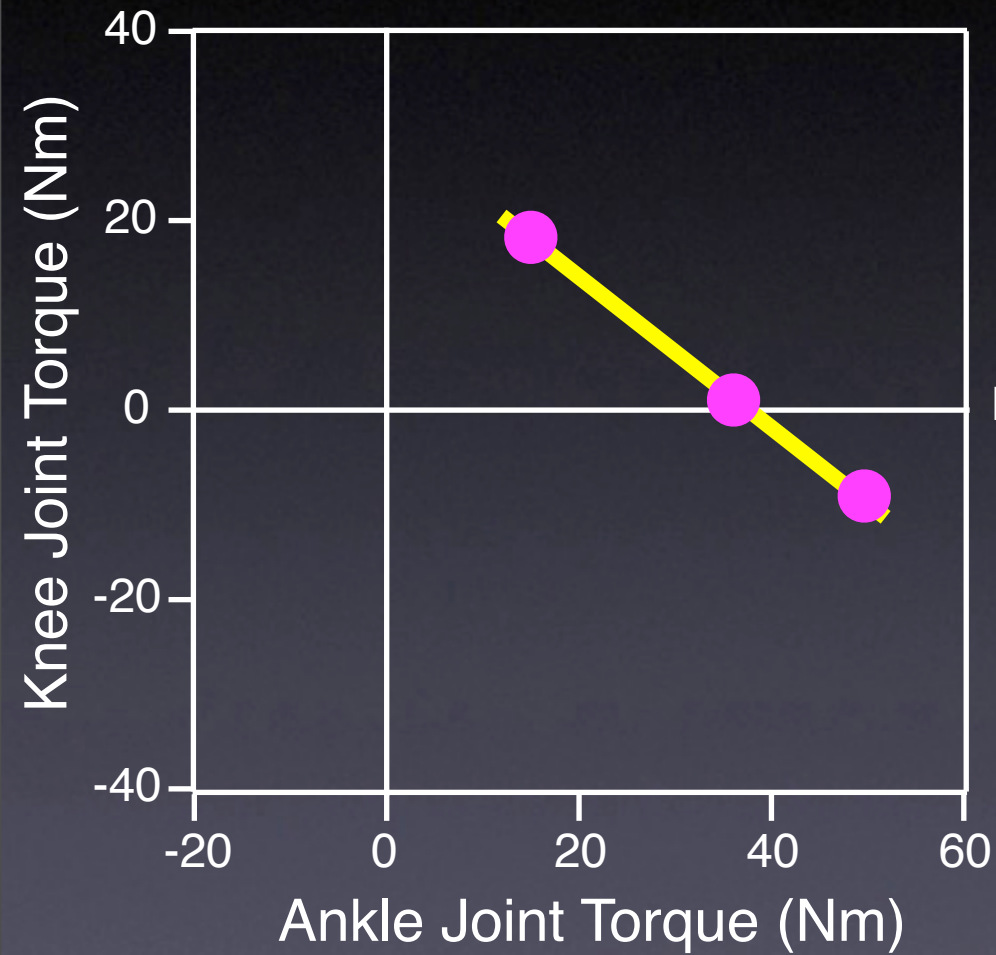
重力環境下で立つ



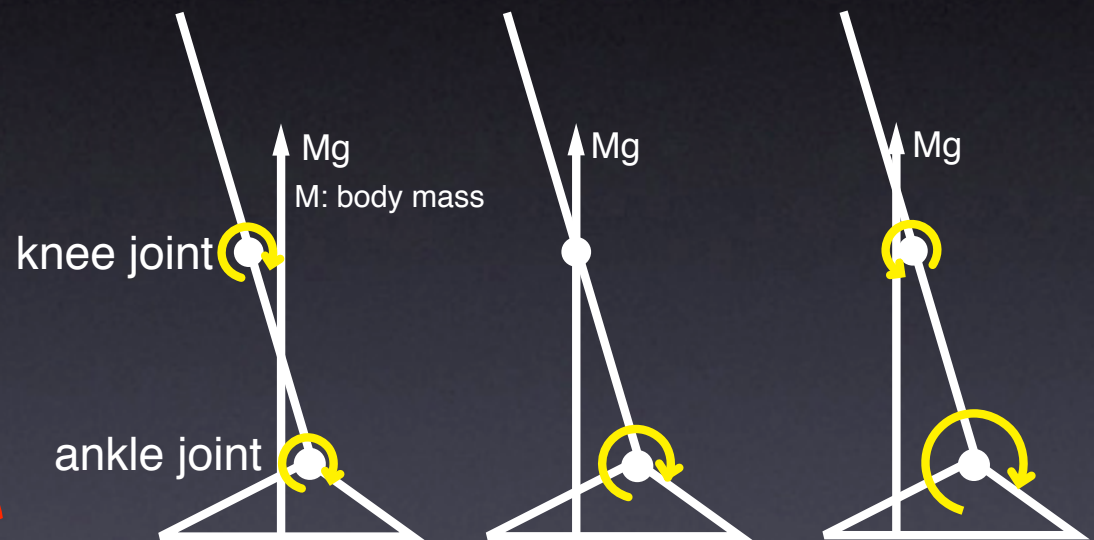
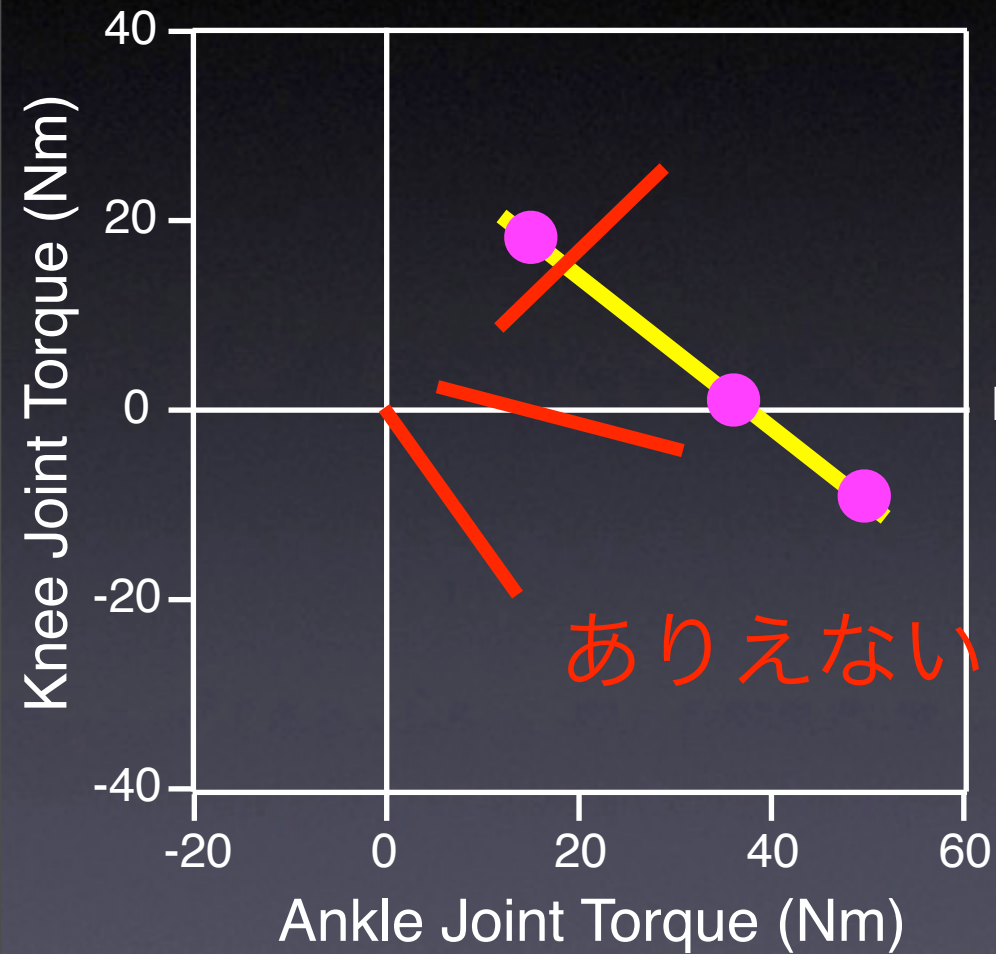
重力環境下で立つ



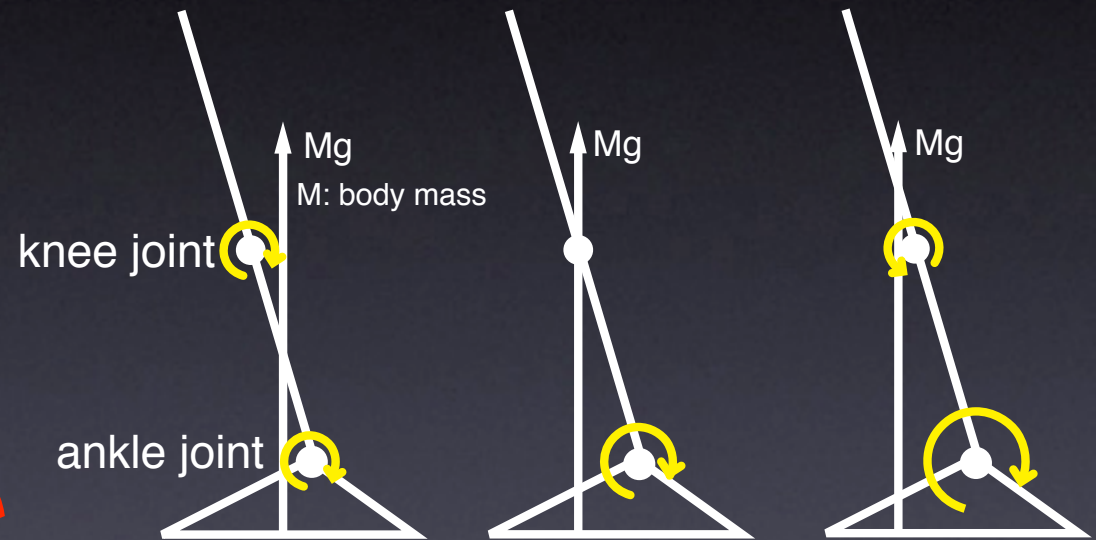
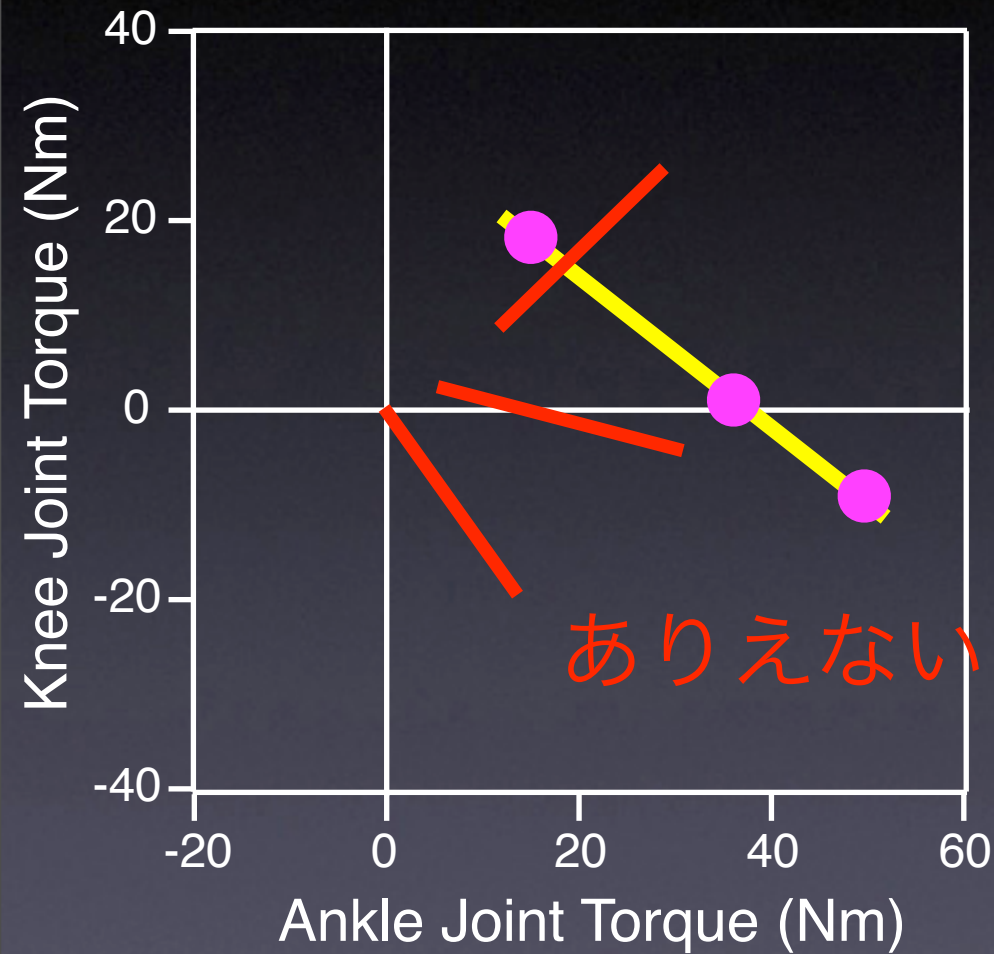
重力環境下で立つ



重力環境下で立つ

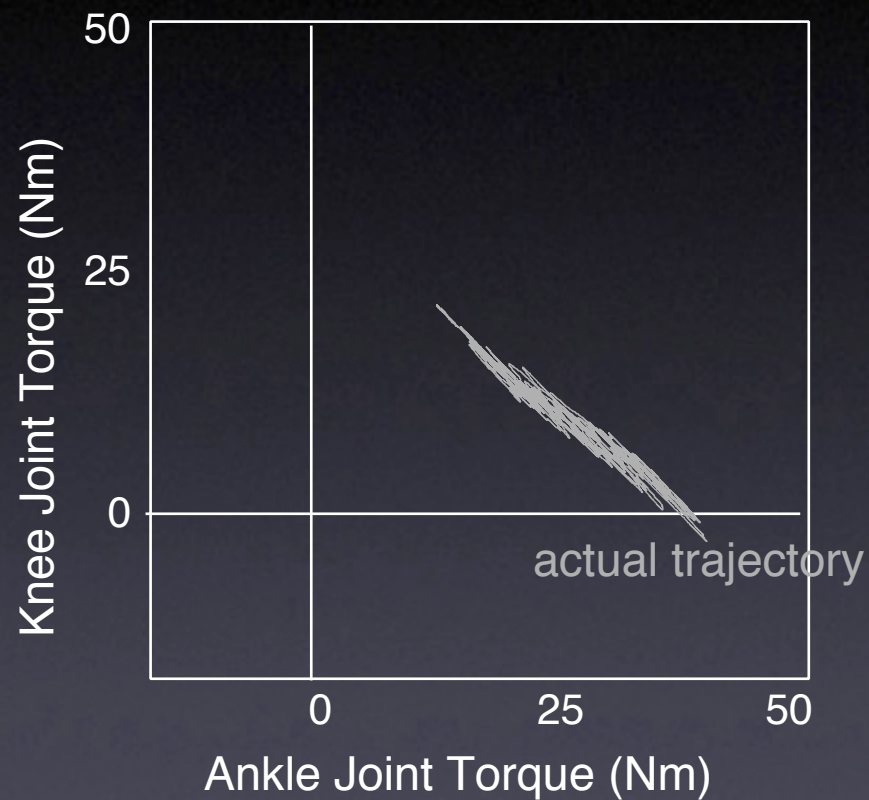


重力環境下で立つ

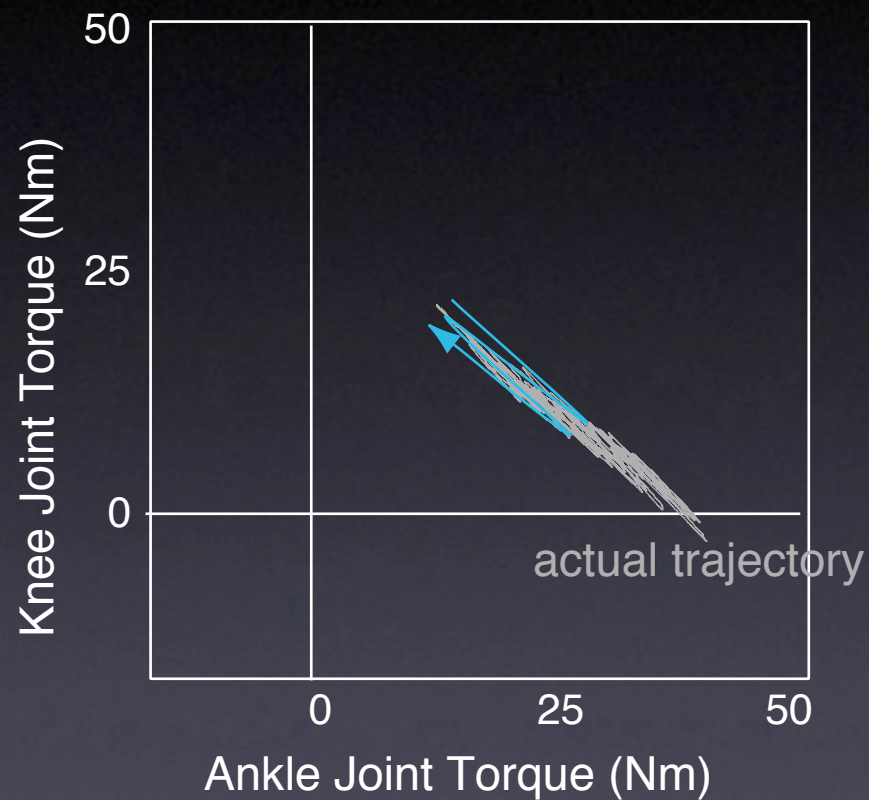


足関節・膝関節トルクの関係は直線上に拘束

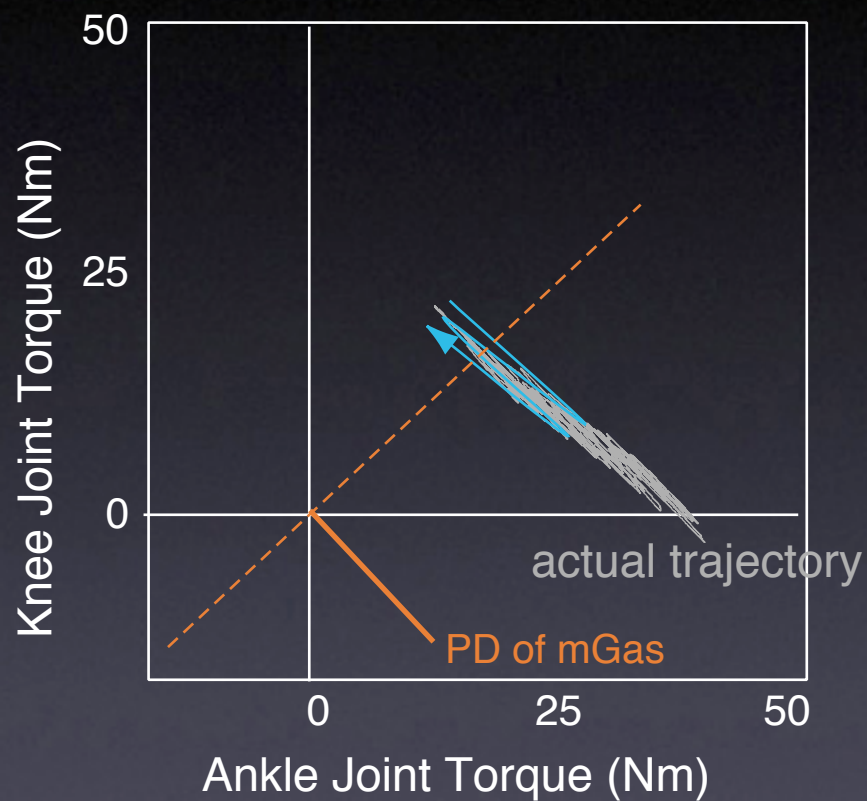
なぜ予測はうまくいったか？



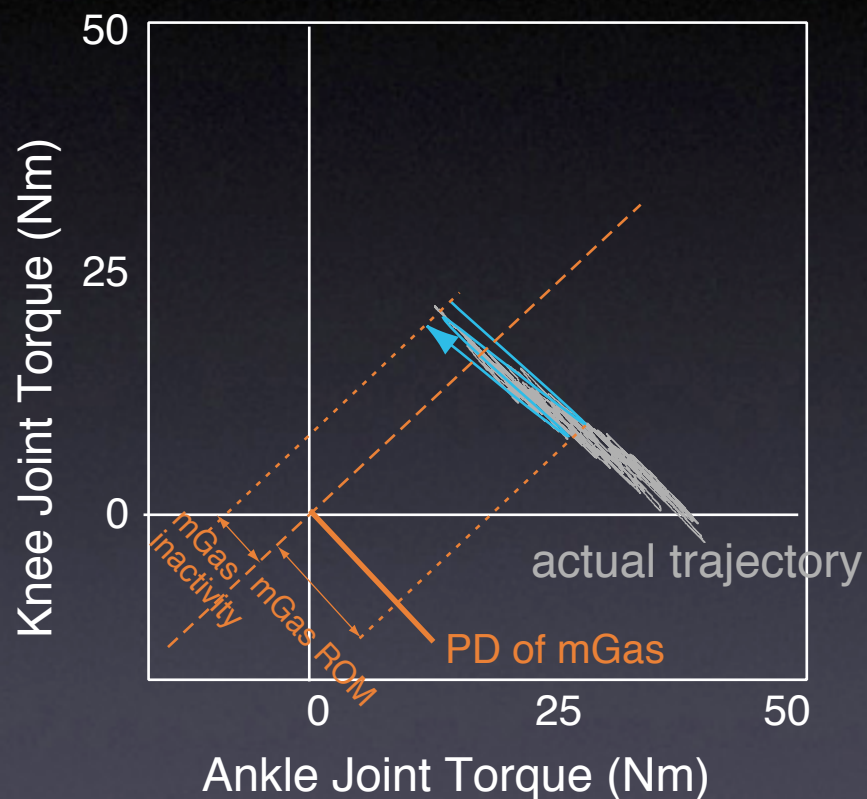
なぜ予測はうまくいったか？



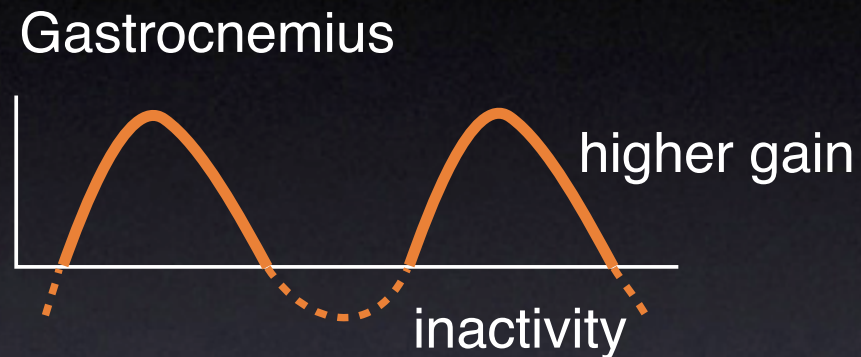
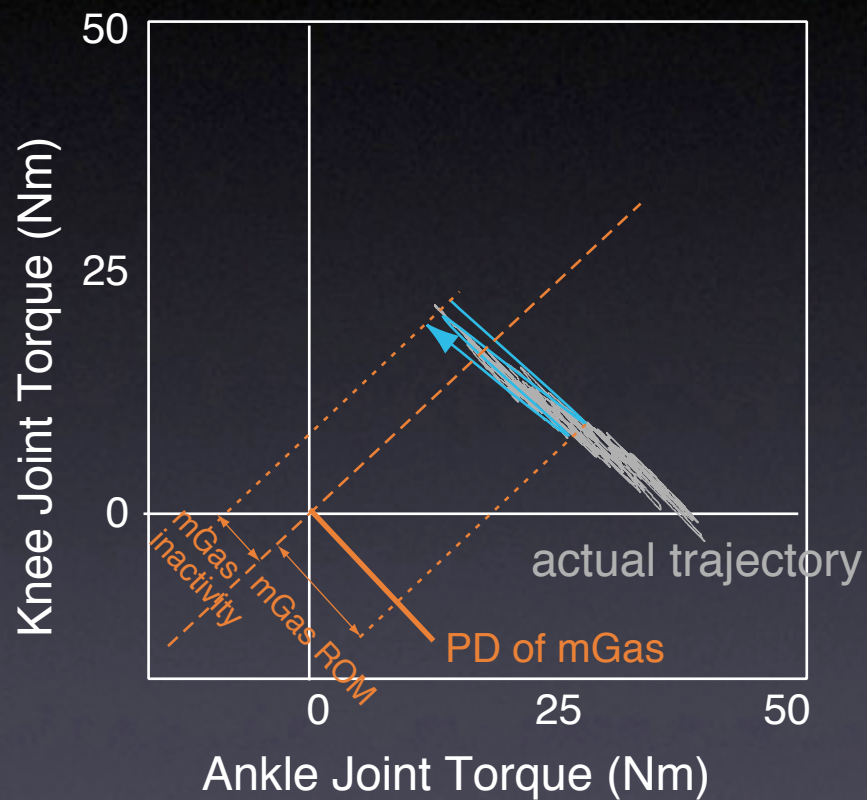
なぜ予測はうまくいったか？



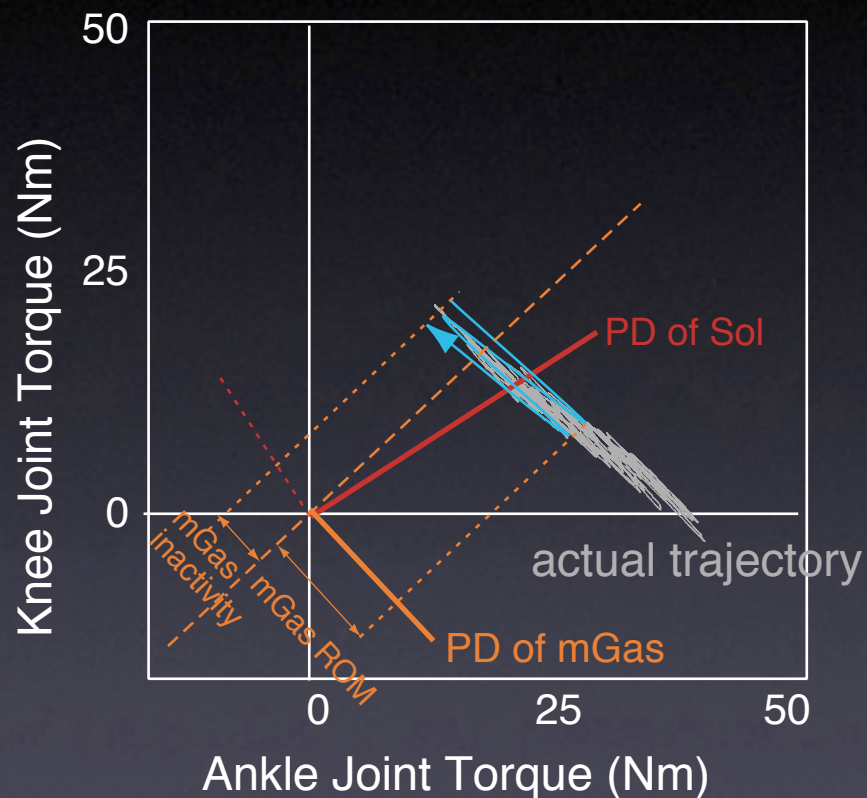
なぜ予測はうまくいったか？



なぜ予測はうまくいったか？



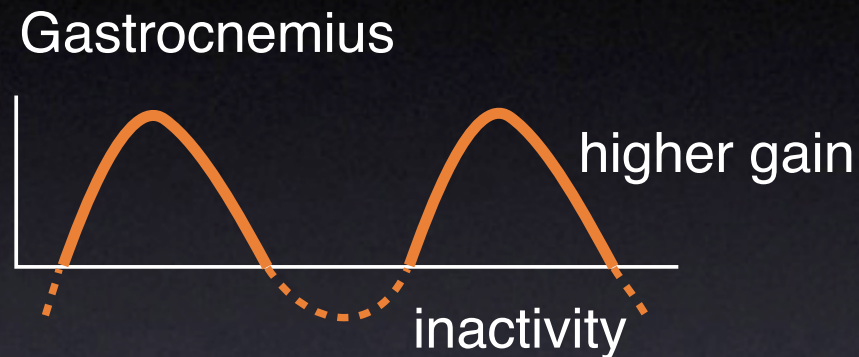
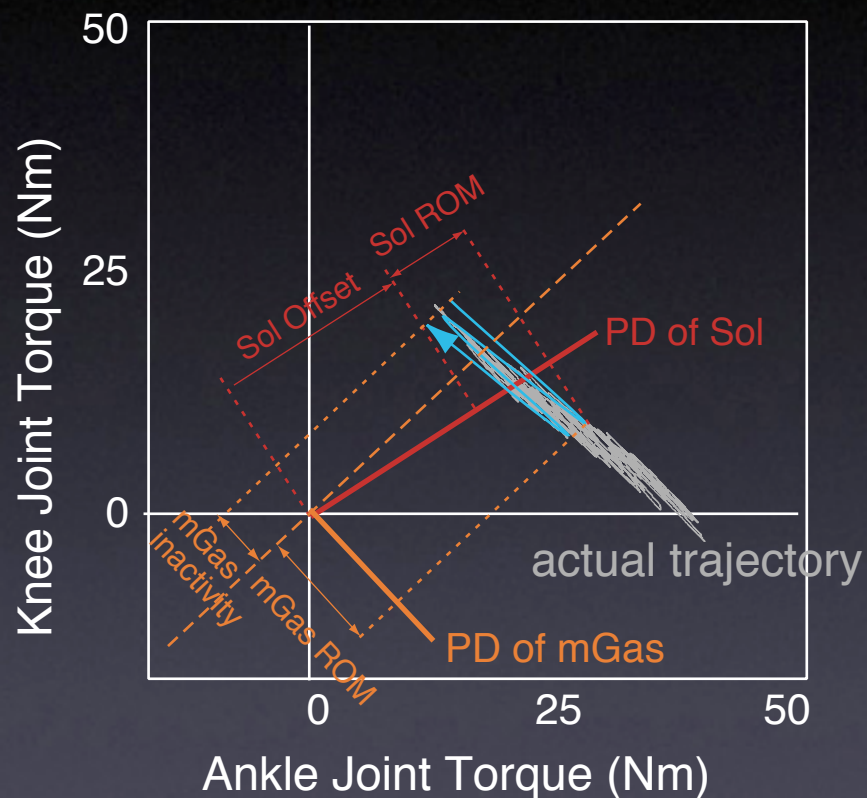
なぜ予測はうまくいったか？



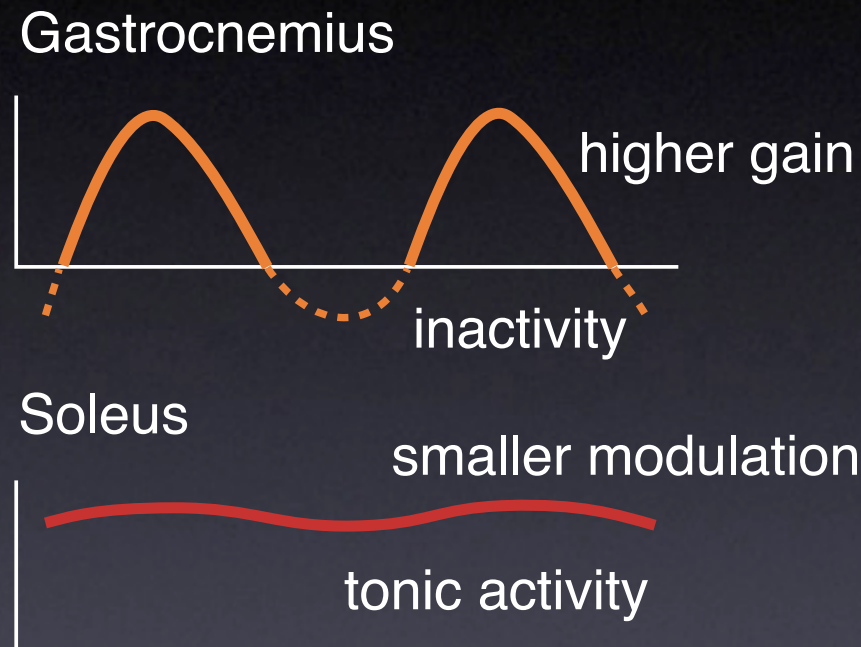
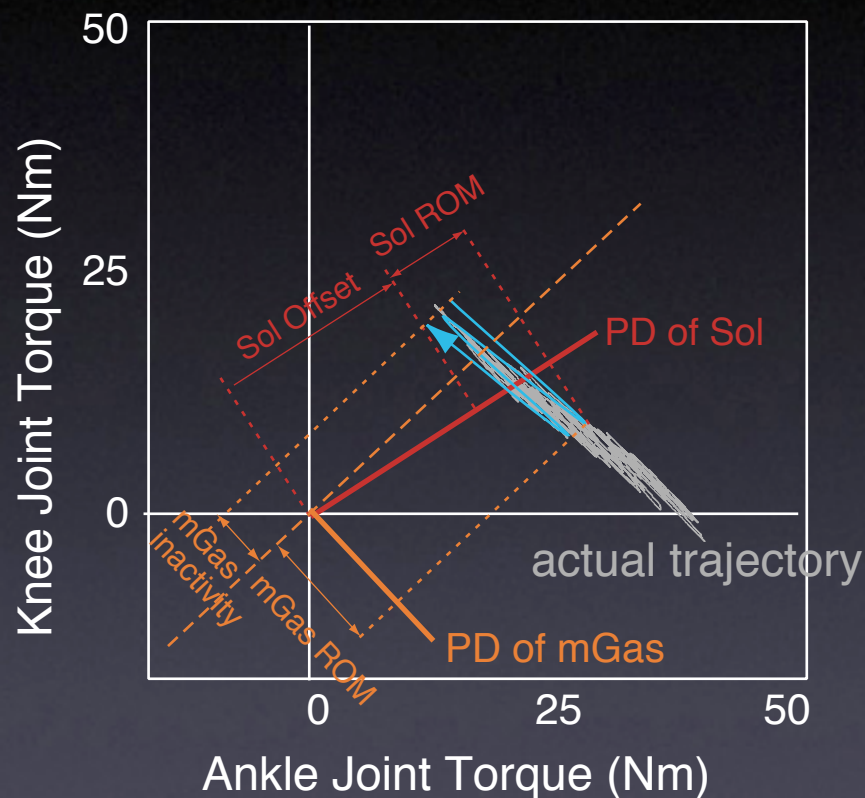
Gastrocnemius



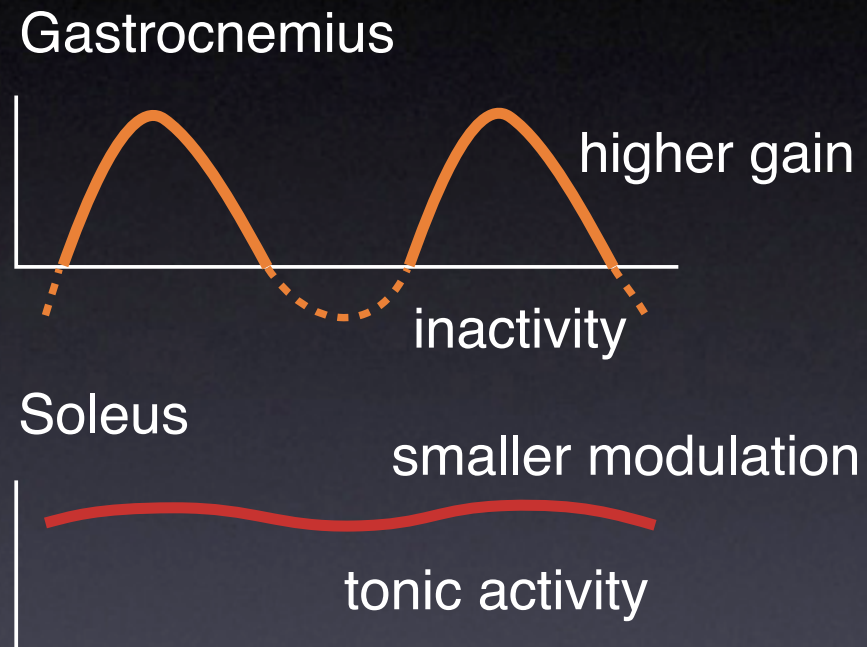
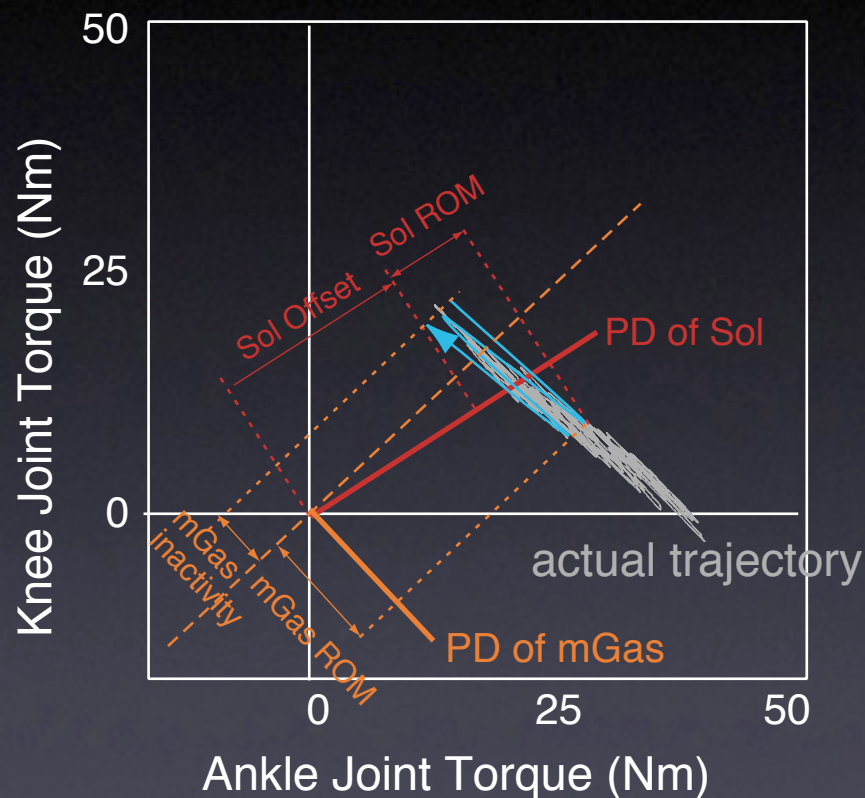
なぜ予測はうまくいったか？



なぜ予測はうまくいったか？

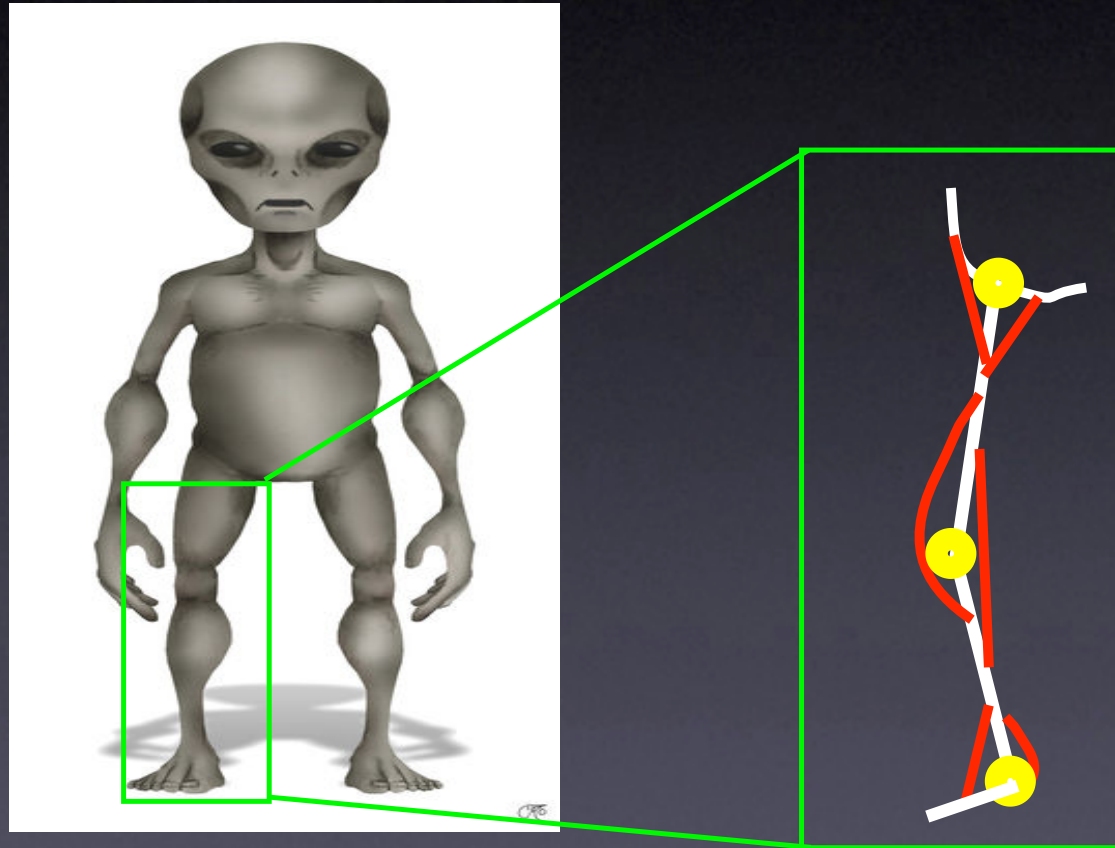


なぜ予測はうまくいったか？



活動動態の違いが合理的に説明された！

二関節筋がなかったら...



諸問題はそもそも生じず退屈だったはず