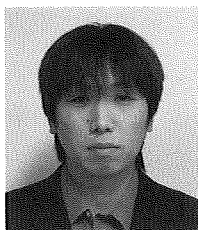


残存機能を十分に活かすためのリハビリ機器と 運動解析技術の統合化

Integration of Rehabilitation Apparatus and Kinematic Analysis Tools to Utilize Remaining Motor Function

1081027



研究代表者

一関工業高等専門学校 制御情報工学科 講師

三 浦 弘 樹

〔研究の目的〕

機能回復などの用途で使用するリハビリ機器と、機能障害に対する支援機器開発およびそのための運動解析はこれまでそれぞれ個別に取り扱われてきた。たとえばリハビリ装置は様々なものがその効果と検証方法とともに提案されている。しかしながら、なぜそのような効果が出るのか、どこが機能が回復してきているための影響かなどまで踏み込んでいないため、効率的な訓練計画や支援機器設計指針を打ち出せておらず、セラピストが行なう経験に基づいた処方の数値的裏付けも与えていない。一方、運動解析で用いられる身体力学モデルは、国内外の多くの機関で開発され、新しいモデリング手法なども発表されているが、動作中の空間的配置まで考慮できるような構成にはなっておらず、また、そのようなデータすら存在しないため、状態推定精度は低いものとなっているし、計算効率も良いとは言えない。さらに、支援機器は個人の自立支援を目指して構築されているはずだが、現状では現在の身体状態のみを観測して機器が構築されているため、将来の機能回復を予測し、残存能力を十分に活用できるような構築方法はとられていない。

本研究の目的は、個別に取り扱われてきたリハビリ機器と運動解析技術を統合し、訓練により生じる身体内部の運動機能の回復予測および

回復状態を把握し、効率的に個人に適合した残存機能を十分に活かした支援機器の設計につなげるシステムを構築することである。

〔研究の内容、成果〕

本研究では、身体内部状態の把握に必要な身体力学モデルとして、上肢と下肢の筋骨格モデルを構築し、これらを組み込んだ訓練システムの構築を目指した。

1. MRI 計測による各筋形状の抽出

身体内部の運動機能の状態推定精度を高めるため、姿勢ごとの骨と骨、骨と筋、筋と筋の相対的变化を、MRI 画像診断装置を用いて計測する。これによって、姿勢による各筋の相対的变化や骨格に対する位置関係を把握することが可能となる。ただし、姿勢変化による計測は前腕部のみとする。上腕と関連する体幹部および下肢は、前腕部ほど複雑な空間変化を伴わないことから一姿勢の計測のみで形状抽出を行った。

MRI 撮影は全身を行い、抽出は上肢および下肢の動作に必要な 75 筋（上腕：17、前腕：19、大腿：25、下腿：14）とした。撮像断面は水平断、シーケンスは STIR 像とし、10 mm スライス厚で撮影した。その後、3次元画像処理ソフト Mimics (Materialise Co. Ltd) を用いて筋領域を抽出し、それぞれの断層画像をス

ライス位置に従って積層することによって3次元の筋形状として構築した（図1）。抽出した筋を部位ごとに3次元化した様子を図2に示す。

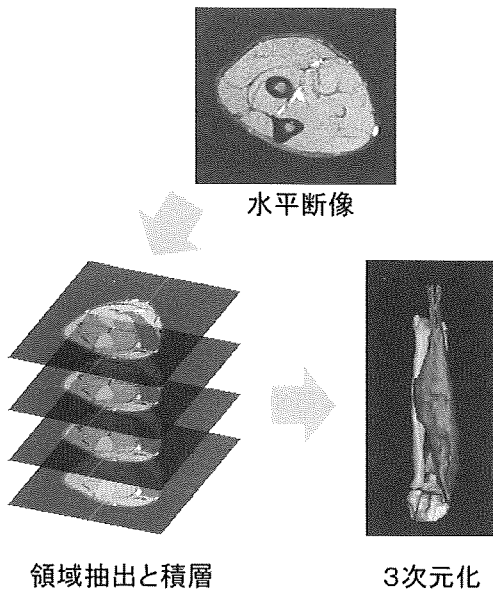


図1 MRIによる筋形状の3次元化

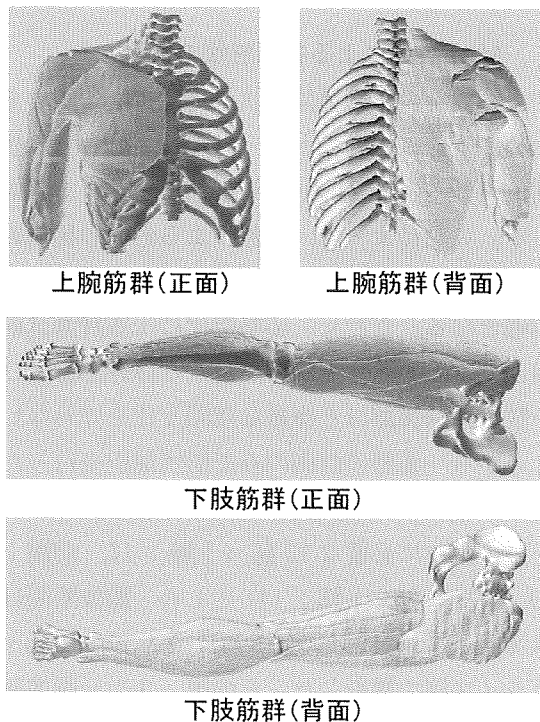


図2 抽出した各筋

2. 筋走行の導出

筋骨格系をモデル化するには、経路点と呼ばれる特徴点の間を線分で結んで筋走行として表現する方法が用いられている。そこで、構築した筋形状から筋走行を導出する。はじめに、構築した3次元の各筋モデルを、Autodesk Inventor（Autodesk社）を用いて筋繊維に垂直な面で間隔10mmでスライスし、各スライス面の重心座標点を求める。その後、すべての重心点を順に線分で結び、若干の修正を行うことで筋走行経路として定義した（図3）。ここで定義した走行経路はモデル構築の際の参考値となる。

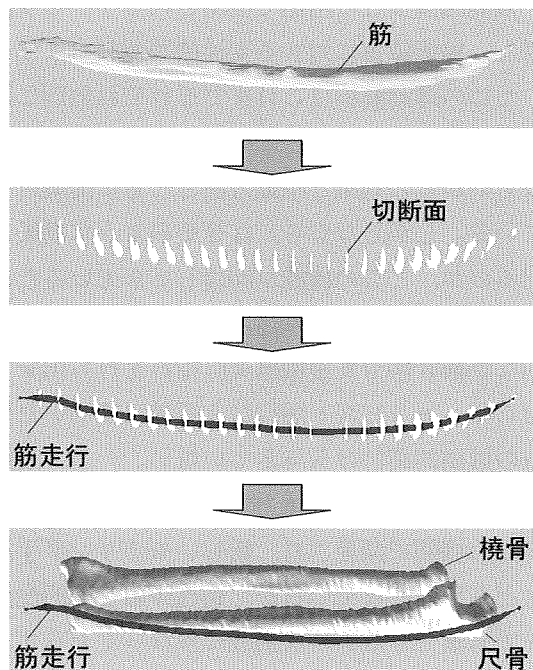


図3 筋走行の導出

3. 身体モデルの構築とモデル化技術の開発

計測した動作中の筋骨格の空間変化をコンピュータ上で再現可能なモデル化技術と、その技術を用いた身体モデルを構築する。これまでボリュームをもつ筋を表現するために空間中に設定した楕円形状に沿って曲線を表現するラッピングアルゴリズムを構築した（図4）。これにより、姿勢変化とともに筋走行を滑らかに変

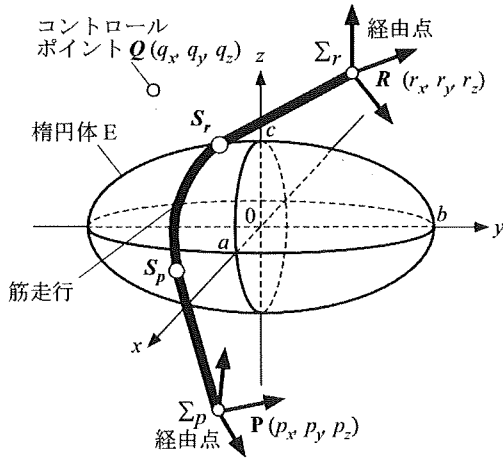


図4 ラッピングによる筋走行表現法

化させることが可能となったが、アルゴリズムの性質上、平面内での曲線表現にとどまっていた。そこで、3次元的な筋走行を表現する方法としてB-スプラインを導入した。

B-スプライン曲線は、 $n+1$ 個の $q_i (i=0, \dots, n)$ を制御点とする位数 k 、次数 $k-1$ の B-スプライン曲線 S は、一様増加のノットベクトル $t \in [x_0, \dots, x_{k+n}]$ ($x_0 \leq x_1 \leq \dots \leq x_{k+n}$) を用いて次のように再帰的に表現される。

$$S(t) = \sum_{i=0}^n N_i^k(t) q_i \quad (1)$$

ただし、

$$N_i^1(t) = \begin{cases} 1 & (x_i \leq t \leq x_{i+1}) \\ 0 & (t < x_i, t > x_{i+1}) \end{cases}$$

$$N_i^k(t) = \frac{(t-x_i)N_{i-1}^{k-1}(t)}{x_{i+k-1}-x_i} + \frac{(x_{i+k}-t)N_{i+1}^{k-1}(t)}{x_{i+k}-x_{i+1}}$$

ここで、曲線が両端の制御点 S_0, S_n を必ず通るようにするため、ノットベクトルは両端で位数分だけ重複させている。

いま、図5に示すように、B-スプライン曲線で結ぶ2点の筋走行の経由点を $P(p_x, p_y, p_z)^T$, $R(r_x, r_y, r_z)^T$ とし、それぞれ隣り合う経由点を $\bar{P}(\bar{p}_x, \bar{p}_y, \bar{p}_z)^T$, $\bar{R}(\bar{r}_x, \bar{r}_y, \bar{r}_z)^T$ とする。このとき、 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 0.5)$ を用いて、

$$Q = P + \alpha |P - R| \frac{P - \bar{P}}{|P - \bar{P}|} \quad (2)$$

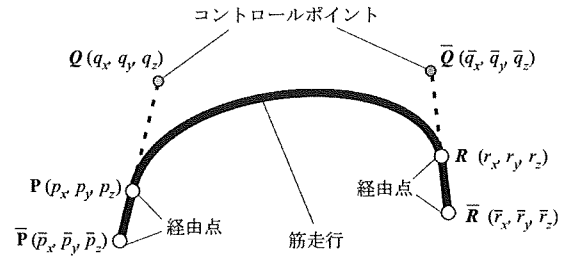


図5 B-スプラインによる筋走行表現法

$$\bar{Q} = P + \alpha |P - R| \frac{R - \bar{R}}{|R - \bar{R}|} \quad (3)$$

なる点 $Q(q_x, q_y, q_z)^T$, $\bar{Q}(\bar{q}_x, \bar{q}_y, \bar{q}_z)^T$ を定義し、これらをコントロールポイントとする。

つぎに、 $P, Q, \bar{Q}, R$ の4点を制御点 q_i とする B-スプライン曲線上の点 $S(t)$ を (1) 式により求める。

最後に、求めた $S(t)$ を順に経由点として追加することで筋走行を表現する。

$P, \bar{P}, R, \bar{R}$ は本来の筋走行経由点、 $Q, \bar{Q}$ はそれぞれの筋走行線の延長線上の点であるため、 α を適切に選択することで $P-R$ 間の筋走行は P 点、 R 点で屈折することなく自然になめらかに結ばれることになる。

スプライン法はラッピングアルゴリズムとは機能上独立しており、それぞれの設定する筋経由点区間での入れ子使用は不可だが共存できるようになっている。そのため、ラッピングで主要な部分を表現し、それらの間をスプラインで接続するという方法が可能となる。

図6にB-スプラインのみを用いて作成した筋走行例を示す。初期経由点は筋付着位置に設定した。広範囲に及ぶ広背筋は複数の線で、三角筋は前面、中部、後面をそれぞれ1本の線で表している。これらの線は、1本ごとにスプライン法が施されている。筋付着付近の経由点の配置と係数 α の値をうまく設定することにより、図のような広範囲でもなめらかな曲線が表現される。

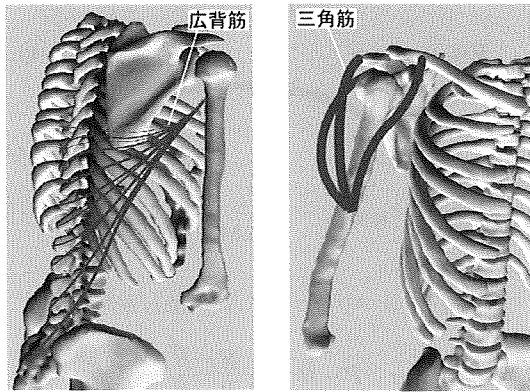


図6 B-スプラインを用いた筋走行例

[今後の研究の方向，課題]

本研究では，効率的に個人に適合した残存機能を十分に活かした支援機器の設計につなげるシステムを構築することを目指した。今回，身体力学モデルに関しては，計測からモデル化技術の構築までできているが，訓練システムとし

ての統合化までは実現していない。現在，計測・解析結果をシームレスにやりとりするための「ファイルデータベースの構築」，および，運動解析の処理速度向上のための「計算用 PC クラスタの構築」を進めている段階である。これまでの開発ソフトウェアが Windows 用であるため，これらシステムも Windows ベースで構築している。当面，これらの構築が課題となる。

通常我々が行う実験では，身体に反射マークを取り付け，赤外線カメラによりその運動を計測する。しかしながら，この方法を一般の患者さんの訓練時に使用するのは非常に難しい。そのため，今後訓練システムを活用していただくための課題として，マークなどを身体に取り付けることなく，直接 3 次元の動作をある程度の精度を保証しながら取得する方法を検討していかなければならない。