

技巧のメカニズム

—チェロ運弓動作の計測と習熟過程の解析—

慶應義塾大学 理工学部
教授 工学博士

山崎 信 寿

1. はじめに

技巧には、ある一定レベルの目的行為をより楽に、あるいは速く行うように改善するものと、目的行為のレベル自体を向上させるものとの二つがある。前者は日常動作や作業動作に多くの例を見ることができ、後者の例にはスポーツや楽器演奏がある。このように、ある目的行為の実現が様々な動作でなされるのは、ヒトの筋骨格系が冗長かつ複雑な構造を持っているためである。この構造の統合は可塑性の高い神経系の学習に帰されることが多いが、逆に構造が学習

にどのようにかかわるかは、必ずしも明らかではない。

このため、本研究では、後者のレベル向上型技巧動作の例として、その非日常性から前者の動作改善型技巧動作と明確に区別しうるチェロの演奏動作を取り上げ、身体構造と技巧動作との関連を調べた¹⁾。両者の関係の解明は、技巧動作の指導や訓練方法の改善にとどまらず、ロボットにおける自律的運動学習アルゴリズムの開発など、様々な分野への応用を期待することができる。

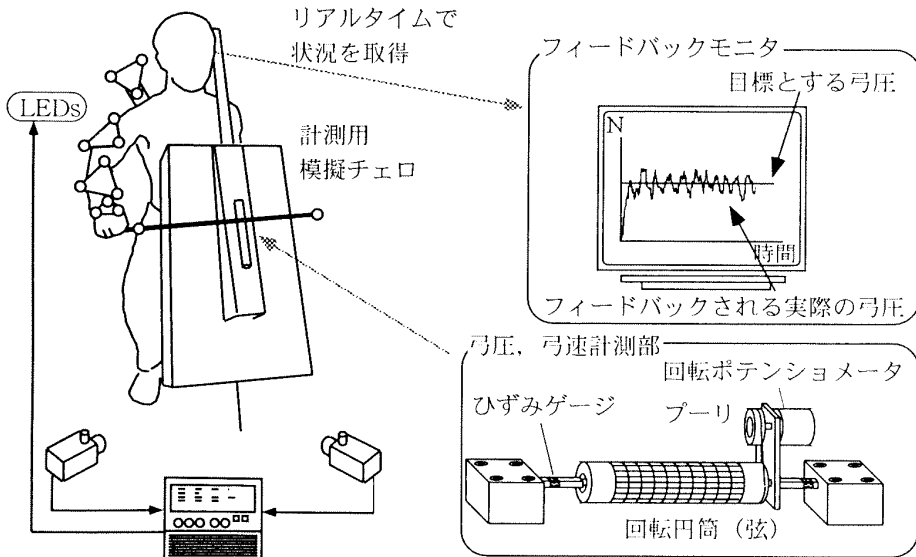


図1 チェロ運弓動作の計測システム

2. 方法

実物とほぼ同寸法で、弦を回転円筒に換えた図1に示す計測用チェロを製作し、音色を決める弓圧を円筒両端の力センサの和で、弓速を円筒の回転速度から、サウンディングポイント(弓が弦にあたる位置)を円筒両端に加わる力の差から計測した。また、これらの情報をリアルタイムでモニタに表示することにより、被験者に運弓状態の視覚的フィードバックを与えた。これは複雑で評価が困難な音の要素を単純な力学量に置き換えることによって、初心者にも同等の動作条件を与えるためである。

本システムを用い、熟練者(チェロ演奏歴6年)と未経験者各2名(成人男性)について、弓圧一定(2N:強めの演奏に相当)の条件で15秒間、20~30回の運弓動作を行わせ、その3次元上肢動作を赤外線半導体カメラシステムで計測した。また、弓、指、手、前腕節、および上腕節から成る3次元上肢剛体リンク系の運動方程式と、計測した上肢運動、弓圧、およびその作用位置データから、各関節まわりの筋張力による関節モーメントを計算した。

3. 運弓動作の特徴

チェロ運弓動作の本質的な難しさは、弓を持つ手と弦との距離が変化しても、弦に加わる力を常に一定に保つようにしなければならないことにある。図2に示す運弓動作の計測結果と、前述の方法によるモデル解析結果によれば、熟練者は上げ弓時に肘を屈曲させ、上腕を外旋さ

せる方向にモーメントを大きく作用させているのに対し、未経験者では肘を伸展させる逆相運動になり、遠位関節ほど運動域が小さくなっていることが分かる。

また、図2の正面像から、未経験者は全体として手全体が下がった運弓動作を構成し、したがって、上肢の位置エネルギーが運弓動作全体に

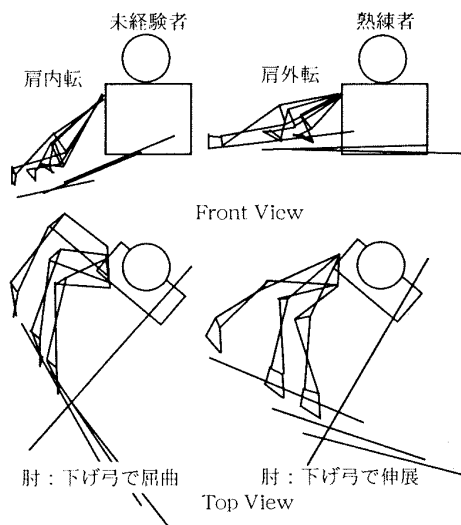


図2 熟練者と未経験者の運弓動作の違い

わたって低く、力学的に楽な動作となっていることがわかる。これに対して熟練者は、上腕の外旋モーメントで手先を浮かせることで、弓元での弓圧がかかりすぎる状態を抑制することができ、また、上腕を外旋位に保つことで前腕の一定質量を弦に加えることができる。

4. 技巧動作と身体構造との関係

熟練者の技巧動作は、筋骨格構造からは決して行い易い動作ではない。表1は上腕内外旋運動に関わる主要な筋の大きさ(PCSA)、内外旋のモーメントアーム(MA)²⁾、最大筋張力(Max Force=PCSA×23N/cm²)、モーメントの発生限度(Max Mom.=Max Force×MA)を示したものである。これより上腕を外旋させる負のモーメントの発生限度の総和は、内旋させる正のモーメントの総和よりも小さく、ヒトの筋骨格構造は、相対的に外旋モーメントを発生しにくい構造になっていることがわかる。

熟練者の動作解析結果によれば、チェロの運弓技巧を高めるには、肩の外転位を大きく保ち、上腕の外旋筋で弓圧を制御し、下げ弓時に肘を

伸ばすように運動を構成すれば良い。しかしながら、これは筋負担を強いる動作でもある。このため、未経験者は身体の質量分布や筋骨格特性から誘発されるエネルギー的に楽な方向に、自然に動作を構成してしまう傾向があり、自発的練習ではレベル向上型の技巧動作に至ることが困難になっていることが示唆される。

5. その後の展開

本研究により、レベル向上型の技巧動作では、身体構造上の「自然さを突き抜ける動作の切り替え」が必要であることが明らかになった。この成果は、いわゆる技芸の分野で経験的に知られていることに、実証的裏付けを与えたものである。一方、本研究のもう一つの結論である「楽なように行う」という未経験者の動作発生様式

表1 上腕内外旋筋のモーメント発生限度

	モーメントアーム MA (mm)	生理断面積 PCSA (mm ²)	最大筋張力 Max Force (N)	最大モーメント Max Moment (Nm)
肩甲下筋	25	1360	312	7.91
広背筋	10	1290	297	3.02
大胸筋鎖骨部	13	840	193	2.45
大胸筋胸部部	20	520	119	2.41
大胸筋腹部	18	520	119	2.11
大円筋	10	840	193	1.96
小円筋	-20	260	59	-1.21
上腕三頭筋長頭	-13	710	163	-2.07
棘下筋	-23	840	193	-4.41

は、日常生活における様々な非習熟的・無意識的動作の理解と人工的生成に重要な示唆を与えるものである。すなわち、このような原理に基づく動作発生手法が開発されれば、人間行動に関する製品安全性の事前評価や、軌道計算が不要な自律的動作ロボットの製作などを行うことができる。

このため、現在はレベル向上型技巧動作から一転して、むしろ何気ない日常的行為である改善型技巧動作を対象に、それが、身体各節の質量分布、関節構造、筋配置、神経結合などの身体構造自体から自然に誘発される「楽なように行う」動作であるという仮説の検証に努めている。

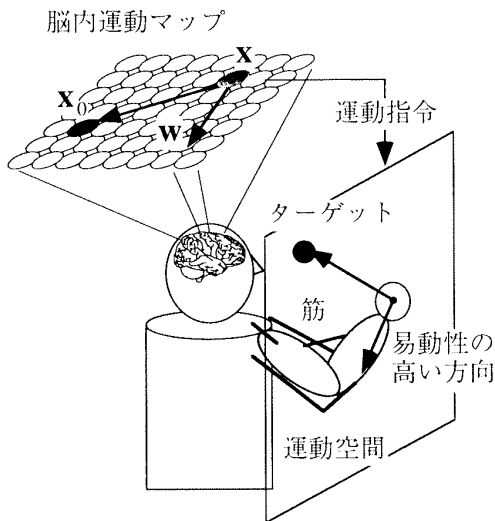


図3 自然な動作発生モデルのイメージ

る³⁾。

具体的には、自然な動作の代表例として様々な箇所からの取り寄せ動作を計測し、(a)身体質量分布と関節特性に基づく行い易さ(易動性)、(b)筋の大きさや筋の配置など筋骨格構造の幾何学的制約に基づく易動性、(c)反射回路など感覚-運動神経系の神経結合に基づく易動性の三つを評価するための上肢神経筋骨格モデルを構築中である。

生理学的には運動野の特定神経細胞は手先の特定の方向への運動に対してのみ選択的に強く活動することが知られている。このため、運動を学習・発生する神経系は、手先の空間位置と脳内の位置との間に点对点の対応関係があると仮定し、図3に示す視覚・運動マップで表した。すなわち、身体構造から自然に誘発される易動性の高い運動方向は運動野にマップされており、その方向と目標位置への方向が一致するように筋が活動する仕組みである。

現在のところ、ロボット的な軌道計算を行うことなく、リアルタイムではほぼ実際のヒトの上肢動作に近い動作発生がなされているが、加速特性などの細部についてはさらに検討が必要である。また、おそらく成長過程での学習に相当する、運動マップの自己組織的獲得方法も開発する必要がある。

一見、回り道のようにも思えるが、このような技巧のメカニズムの基本を明らかにすることが、我々が作り出す「サウンド」の技術的基盤を与えるものと考えている。

