

研究題目	チェロ運弓動作の計測と習熟過程の解析	報告書作成者	山崎 信寿
研究従事者	山崎 信寿		
研究目的	<p>ヒトは身体の筋骨格構造を巧みに協調させることによって様々な技巧動作を行うことができる。しかし、ヒトの筋骨格系は冗長かつ複雑な構造を持つために、目的とする技巧動作の獲得には一般に長期間の訓練が必要となる。したがって、技巧動作の獲得メカニズムが明らかになれば、その指導方法や訓練指針の改善、あるいは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応用を期待することができる。</p> <p>技巧動作の獲得過程の解析は、例えば、クロール（はいはい）[Sparrow, 1987]、ダーツの投てき[McDonald, 1989]、書字[Newell, 1989]、スキーのスラローム[Vereijken, 1992]、サッカーのキック[Anderson, 1994]などについて行われているが、習熟過程における運動変化の合理性についてはほとんど言及されていない。</p> <p>一般に動作習熟による運動変化を知るには、同一個人を追跡調査する方法と、未経験者と熟練者の比較など習熟度別に比較する方法とがある。また習熟による運動変化を強調するには、対象動作が非日常的であることが望ましい。このため本研究では、被験者の生活履歴が少ないと考えられるチェロの運弓動作を対象とし、未経験者の習熟過程の計測と、熟練者との比較を行った。</p> <p>運弓動作は、冗長かつ複雑な自由度を持つ上肢筋骨格系を巧みに協調させ、運動と力を同時に制御しなくてはならない高度な技巧動作である。このため本研究では、身体各部の剛体的特性や関節の可動特性、筋や骨の形態学的特性など筋骨格系の構造と運弓動作を関係づけ、弦に加わる力と上肢動作を計測すると共に、身体構造をモデル化して習熟過程の生体力学的解析を行った。</p>		

## 研究内容

未経験者と熟練者にチェロの運弓動作を行わせ、その運動の特徴を解析した。具体的には、様式10の図1に示すような、実物とほぼ同寸法の計測用チェロを製作し、チェロの音色を決める弓圧、弓速、サウンディングポイントをリアルタイムで計測した。そしてそれらを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簡略化し、ヒト楽器系の相互作用の包括的な解析を可能にするためである。計測データはA/D変換ボードを介してパソコンに取り込み、図1のようにリアルタイムで表示した。

被験者は、熟練者（チェロ演奏歴6年）と未経験者（成人男性）各2名であり、各人に弓圧一定（200gf）の条件で15sec間・20試行（未経験者は30試行）の運弓動作を行わせ、そのときの upper limb 動作を計測した。3次元運動計測には赤外線半導体カメラシステム（浜松ホトニクスC3570）を用いた。標点は手部、前腕部、上腕部、肩甲骨部、体幹（胸骨部）にそれぞれ3点ずつ装着し、3点の絶対座標から、回旋を含む3軸系オイラー角度を求めた。

得られた弓圧変化と関節角度変化の時系列データを基に、熟練者と未経験者の運動の習熟度と運弓動作を比較した。また、技巧動作の本質的な差違は、筋が発生する関節まわりのモーメントの違いに表れると考えられるため、各関節の関節モーメントを算出し、熟練者と未経験者間で比較した。関節モーメントは、上肢運動変位、弓にかかる反力、およびその作用位置データを、図2に示すような直鎖型の剛体リンクで表される上肢モデルへ入力することによって算出した。さらに、筋活動と関節運動との対応関係を明らかにするために、人体断層画像を用いて上肢の骨や筋の幾何学的構造を取得し、図3に示す精密上肢筋骨格モデルを構築した。これより特定の関節モーメントを発揮するためには、どの筋を活動させなければならないかが推定できる。これらのデータを総合的に検討することにより、運動習熟メカニズムの抽出を試みた。

研究概要報告書

( / )

<p>研究のポイント</p>	<p>(1)従来のアプローチではほとんど行われていない身体構造の観点から、技巧動作の習熟メカニズムの抽出を試みる。従来、運動の習熟に関する研究はほとんど運動軌跡の解析にとどまり、その運動の合理性や合目的性など、運動原理にかかわる考察は行われていなかった。本研究では、身体構造つまりハードウェアの特性に着目して解析した点で先行研究とは異なり、独創的である。(2)実際の楽器に類似する計測機器を試作する。これにより、弦に加わる力や速度などの具体的、定量的情報で動作を評価することができる。(3)長年にわたって経験的に蓄積されてきた演奏動作の訓練や指導方法に対して生体力学的根拠を提供する。これにより指導の効率化や訓練方法の改善を図ることができる。</p>
<p>研究結果</p>	<p>(1)未経験者は熟練者と比較して、弓圧を一定に保つことができず、弓圧は弓元で高く、弓先で低くなるのがわかる(図4)。このように弓圧の作用位置とそれをコントロールする手部の間の距離が変化するにもかかわらず、弦に一定の力を作用させる点に、チェロ運弓動作の本質的な難しさがある。(2)熟練者は運弓動作中、肩の外転が比較的大きく保たれているにもかかわらず、未経験者のそれは小さく(図5)、上肢の位置エネルギーが小さい力学的に楽な動作となっている。これは関節モーメントにも表れている(図6)。(3)手首外転角度のように、未経験者は全体的に関節の可動範囲が小さい。(4)未経験者と熟練者の関節モーメントを比較すると、上げ弓時に上腕を外旋させることによって手先を浮かせ、弓圧を制御している(図6)。そのため未経験者は上げ弓時に肘を屈曲させ、上腕の熟練者は逆に弓元へ弓を運ぶにつれて屈曲させる逆相運動になっている(図5)。熟練者は、自然な動作においてはほとんど用いられない棘下筋と小円筋で、このような制御を行っていると考えられる。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>本研究で抽出したチェロ運弓動作の技巧のポイントに基づいて教育を行った被験者と、情報を与えないで練習した被験者との間で運動の比較を行い、本研究で得られた仮説の検証を行う予定である。また、未経験者の運動は力学的(構造的)に楽な運動を間に合わせ的に構成しているのに対して、熟練者の運動は上肢の構造制約をうまく利用してタスクの遂行に合理的な運動を獲得しているなど、運動の発生原理は身体筋骨格構造と密接な関わりを持っていることが示唆された。その関連性から運動獲得メカニズムを数理的にモデル化した試みは今までなく、技巧獲得アルゴリズムを解明する上で新たなブレークスルーとなることが期待される。</p>

説明書

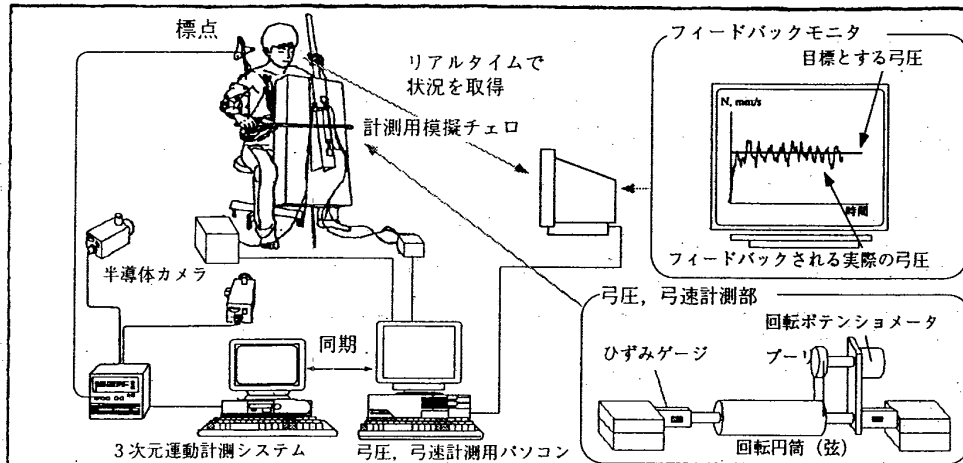


図1 計測システムの概要：計測用チェロは、円筒を支持する両端の梁に貼ったひずみゲージによって弓圧（弦にかかる力）を計測し、またポテンシオメータにより得られる弓の変位を微分することによって弓速を得る。さらに両端の力の大きさの差違よりサウンディングポイントも検出できる。被験者の運動変位は、2台のカメラで標点の3次元位置を計測することによって求められる。

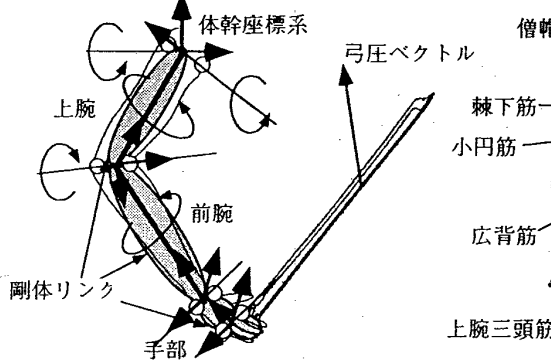


図2 上肢剛体リンクモデル：上肢構造を直鎖型剛体リンクで近似し、剛体特性や関節の受動的弾性特性を生体と一致するように定める。このモデルを用いることによって、筋が各関節で発揮しているモーメントを力の釣り合い条件から求めることができる。

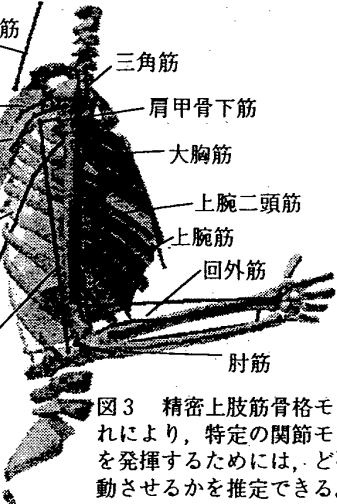


図3 精密上肢筋骨格モデル：これにより、特定の関節モーメントを発揮するためには、どの筋を活動させるかを推定できる。

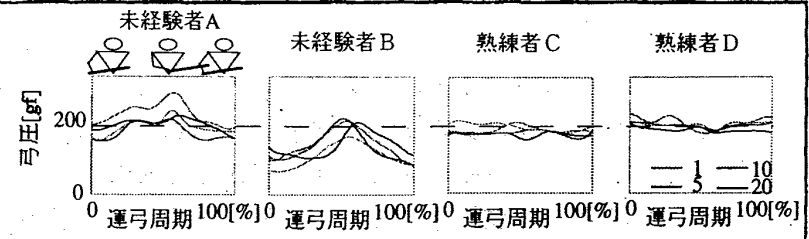


図4 未経験者と熟練者の弓圧の比較：各被験者についてそれぞれ1,5,10,20試行目を表示した。未経験者の運動は試行回数の増加と共に弓圧を一定に保てるように習熟するものの、熟練者とは本質的に習熟レベルは異なっている。

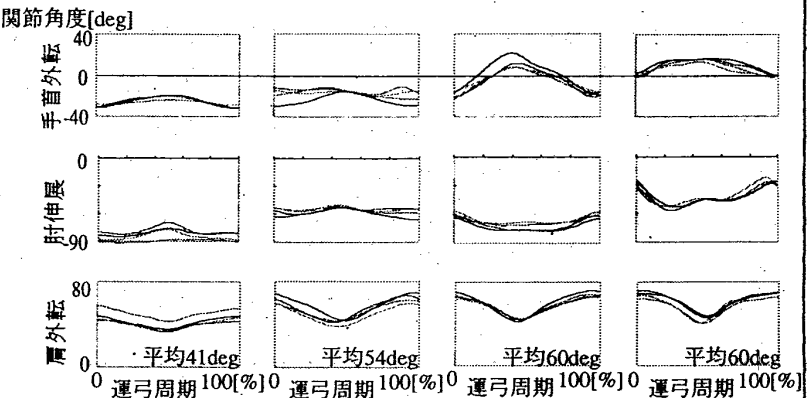


図5 未経験者と熟練者の運動の比較：運動は個体差が非常に大きい、未経験者と熟練者の運動を分け隔てている動作の特徴は、(1)手首の内転運動の有無、(2)肘関節の屈伸角度の運動位相、(3)肩関節平均外転角度、に表れていることがわかる。

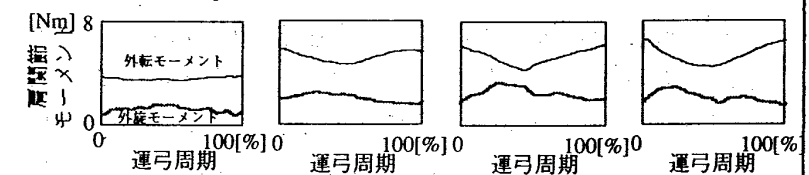


図6 未経験者と熟練者の肩関節モーメントの比較：熟練者の肩関節外転および上げ弓時の外屈モーメントは未経験者と比較して大きくなっている。

(注：フローチャート図、ブロック図、構成図、写真、データ表、グラフ等 研究内容の補足説明にご使用下さい。)

様式-10