

弛緩状態の人間の肘まわりの力学特性解析、並びにその実験システム

三重大学工学部工学研究技術部

澤井秀樹

sawai@ss.mach.mie-u.ac.jp

1. はじめに

工学部のシステム設計研究室では機械と人間の協調動作のために、人間の力学特性を調べてきた。本研究はその一つで、人間の肘を回転中心として、前腕が回転運動する際の力学的特性を調べている。この発表では、その中の弛緩状態での力学特性について紹介する。この研究のために設計・開発した実験装置を紹介し、更に計測誤差等を少なくするため行った幾つかの工夫についても同時に紹介する。

2. 予備実験

図-1のステップ応答は、無抵抗で回転出来る水平板の上に腕を置き、その回転中心に肘を合わせている。

外から水平板にトルクを与え、腕がほぼ一直線に伸びる状態にあり、その直後トルクを解放した後の前腕と上腕の交差する角（肘の角度）の時間応答曲線である

その際、被験者は十分にリラッしている。

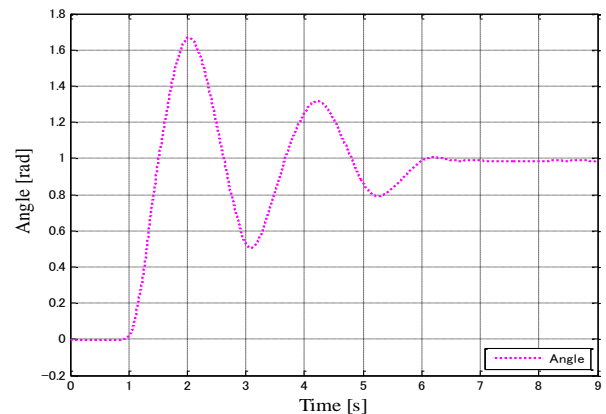


図 1 ステップ応答

2. 1 推定できる特徴と課題

上の条件で実験した結果は次のようになった。何往復か一定周期で振動し、早く減衰していることから

①弱い復元力がある

②同時に大きな減衰要素がある

繰り返し実験すると、毎回、静止位置のずれがあるので

③肘周りに摩擦力のような非線形要素がある

以上の事から、実験装置には次のような機能が求められる

① 復元力特性を正確に測定できること、

同時に大きな減衰には摩擦要素が含まれているため、粘性要素との複合された減衰である可能性があり

②粘性要素と摩擦要素の両方の解析のための動的な実験が出来ること。以上のことから装置には次のような条件を設定した。

2. 2 本実験装置の必要条件

①前腕の慣性モーメントに比べて、前腕支持部は高い剛性を保ちながら、充分小さい慣性モーメントに抑えなければならないこと。

②肘回りの摩擦トルクを計測するために、装置の回転摩擦抵抗を充分小さく抑える事

3. 実験装置

図-2に実験装置を示し、図-3にその軸受部を示す

ただし、図-2は協調動作実験装置の一方（被験者側）のみを示してあり、同図上の角パイプが前腕支持部であり、黒いスポンジの凹部に前腕を置く構造である。

また、二重構造の軸受部を右下に示す。
 前腕支持部や、その下の伝達部は、軽量化と慣性モーメント軽減のために、肉厚0.5mmのアルミ角パイプを使用し、内部には発泡ウレタンを圧入してある。(ウレタン等の圧入で高周波数の振動ノイズに対する減衰力が大幅に増し、機械振動の高周波ノイズ低減には有効な方法です)。
 また、軸受部とパイプ根元の結合は強い締まりばめで、更にその上に多数の小径ボルトによる締結を行い、高剛性と軽量化の相反する条件を両立させた。

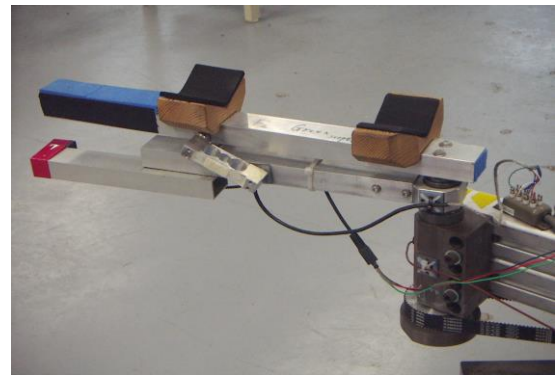


図2 実験装置

3.1 二重ラジアル軸受とスラスト軸受の構造

上の②の装置の摩擦抵抗軽減化のために以下のような構造を選択した。

図-3の中心の軸は前腕の回転支持部であり、その周囲には伝達部の中空軸がある。回転支持部の垂直荷重は最上部のスラスト軸受が持ち、同心の中空軸、伝達部スラスト軸受を介して軸受箱に伝わる。

これにより、腕の自重の大きな垂直荷重が加わっても殆ど無抵抗で回転できる。

また、長く伸びた前腕のモーメントによる水平方向の大きな圧力は、上下に話して配置したニードルローラ軸受で中心軸、中空軸共に受けている。

この、摩擦抵抗が殆ど生じない機構で、中心軸と中空軸の両軸間に生じている伝達トルクを効率よくロードセルに伝えることができる。

軸下端にはタイミングベルトプーリが在り、ベルトにより協調運動の相手側とトルク伝達している。

以降は省略する。

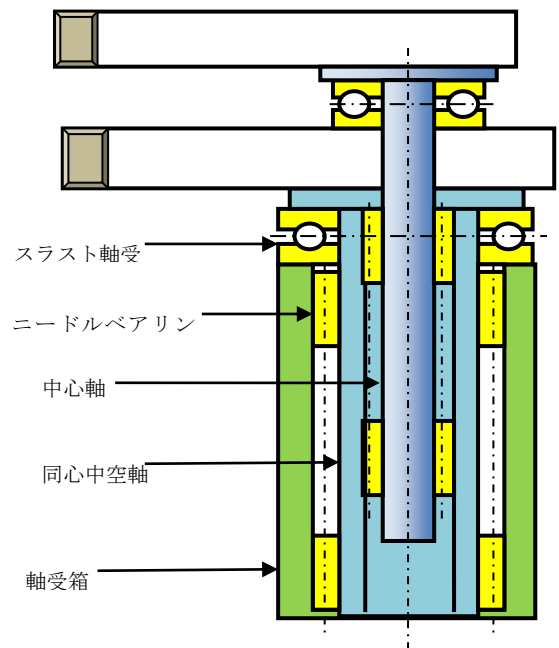


図3 二重軸受の構造

3.2 ロードセルとフリーベア (図-4 参照)

本装置に採用したロードセルは、はかり用のもので、比較的安価なものが多く(計測用のビーム型の2割前後程度)指定された荷重方向以外に力が作用しなければ、良好な線形性が得られ、計測用の物と遜色ない。

しかし、摩擦などの想定外の要因でセンサーを目的外の方向にも歪ませてしまう場合が多く、これが大きな計測誤差として現れる(本装置も図の左の角パイプは前腕の自重により、図の手前側が弾性変形し、下方に僅かに沈む)。

この方法により余計な方向へのロードセルの歪を避けることができる。

また、この方法により一般用のロードセルの使用も可能になり、コストも相当抑える事が出来る。

フリーベアとロードセルの間の薄板は絶縁板で、筋電等の生体信号からのノイズを絶縁する。

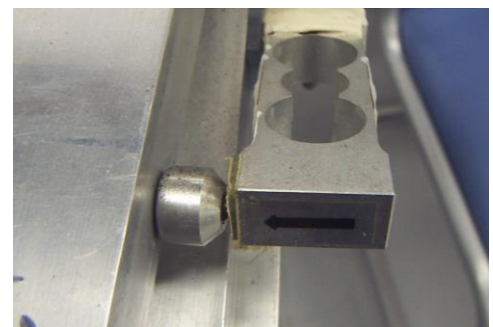


図4 ロードセルとフリーベア

4 実験結果と減衰要素の特定

4-1 静的実験結果とトルクロス

図-5の様に被験者は上体が固定できる椅子にすわり、上腕を横方向に水平まで上げ、肘を装置の回転中心に合わせ、図-2の装置の前腕支持部に乗せている。力を抜いて、リラックスしている被験者の腕に、伝達部側からトルクを加え、ゆっくり回転させた。その際の回転角 θ とトルク(τ)の関係を現した特性図を図-6に示す。

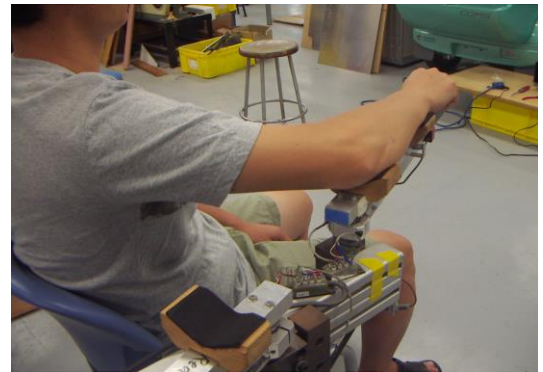


図5 腕を乗せた状態

前腕が胸から離れる方向の回転を正方向回転とする。交互に回転方向を変えると、同図のようなリサージュ図形を示す。これは正方向から逆方向に転換する場合も、またその反対の場合も、肘周りに同じ大きさのトルク損出が生じている。

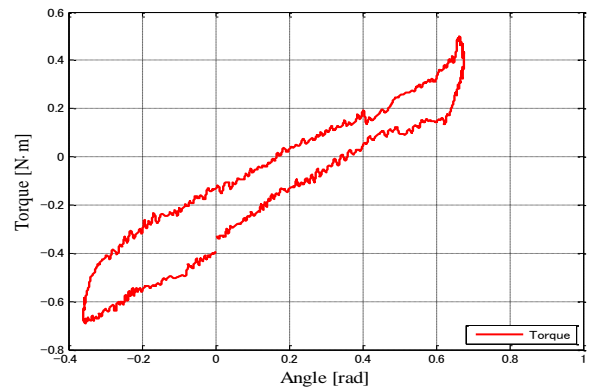


図6 静的 $\theta - \tau$ 特性

4-2 動的実験と粘性抵抗の同定

図-7及び図-8は先の実験の、腕を素早く動かした実験結果である。

図-7は前腕の慣性力と肘回りのトルク τ の時系列を示したものである。

ただし、この場合は正方向回転のみ行った。

τ は加減速により生じる慣性力も含まれたものであり、この曲線から、別途求めた慣性力（加速度を計測し慣性力を計算した）を差し引いた後に、回転角 θ と対応するばね特性図で示したものが図-8である。

この結果、静的に求めた図6の上側の曲線（同方向に動いたもの）と差異は殆ど認められない。

また、同図中央部が最大速度になるが、この付近でも τ の増加は見当たらない。このことから、粘性（速度）に起因する抵抗力は認められず、少なくともこのも日常生活の運動速度では無視できる。

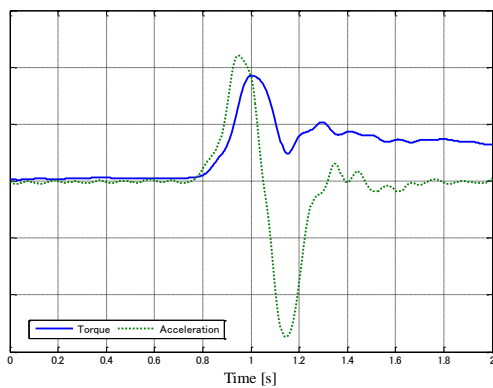


図7 早い運動時の τ と慣性力

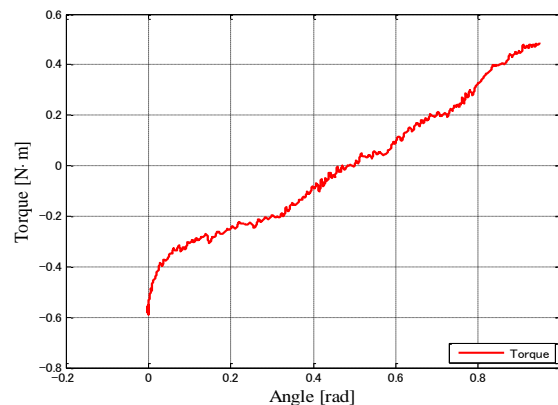


図8 慣性項を除いた高速時の $\theta - \tau$ 特性

5. まとめ

1) 肘を回転中心として運動する前腕には弛緩状態に於いてばね復元力が在る。

- 2) 回転方向に反する摩擦抵抗のようなトルクロスが在り、回転方向により異なる平衡点が二つ存在する。またこの摩擦抵抗が大きな減衰要素になっている。
- 3) 生体の力学モデルは、ばねと粘性で現される事は少なくないが、日常的な速度において粘性抵抗は認められない事が分かった。
- 4) アーム部を薄肉アルミパイプと発砲樹脂で構成し、更に、支持部を締めりばめとボルトによる複合した締結にすることで、軽量化及び慣性モーメントの低減、と同時に、これと相反する高剛性を得る事が出来た。
- 5) 回転支持部を同軸の二重軸受構造にした事で、ワーク動作と腕の回転中心を一致させ、実験モデルの単純化が出来た。
- 6) 5) の構造は同時に、両軸間のロスのないトルク測定を比較的安易にさせた。
- 6) 安価な一般用のはかり用センサーを使用したか、鋼球により力伝達することで正確な計測が可能になった。