

肩運動シミュレータ SKN-1B による 肩甲骨面内挙上/降下運動の再現性の改善

同志社大学
信原病院

○中村康雄
駒井正彦, 信原克哉

新潟大学 森山賢一, 林豊彦

1 はじめに

ヒトの肩を構成する肩甲上腕関節は、上腕骨骨頭と肩甲骨関節窩からなる球関節である。その解剖学的な特徴は、上腕骨骨頭に対して肩甲骨関節窩の面積が小さいことである。これにより広い可動域が実現されるが、その反面、不安定さの原因ともなる。そのため、スポーツ動作など肩関節に大きな負担がかかる動作を繰り返すことにより、肩関節に障害が発生することがある。この障害発生メカニズムの解明が求められている。従来から屍体モデルを用いて、肩関節に加わる負荷が測定されてきた^{1,2)}。しかし、屍体モデルは個体差が大きいため、同条件での実験が難しい。そこで我々は、解剖学的にヒトに近いロボット型の肩運動シミュレータ SKN-1B (Fig.1)を開発してきた^{3,4,5)}。これまでは、シミュレータを制御する駆動信号を試行錯誤的に決定していた。そのため、筋力バランスを変える、上腕に加える負荷を変えるなどの条件を変更することが困難であった。そこで本研究では、様々な条件下において目標運動を高い再現性で実現するために、駆動信号を学習制御することを目的とする。

2 肩甲上腕関節

肩関節に関与する筋群は、アウトマッスルとローテータカフ（回旋腱板）の2つに分類できる⁶⁾。前者は、表層に位置する大きな筋であり、強大な力を発生できる三角筋、大胸筋、広背筋、大円筋から構成される (Fig.2)。後者は、深層に位置し、おもに肩関節の安定性に貢献している。棘上筋、棘下筋、小円筋、肩甲下筋から構成される (Fig.3)。上腕の挙上には、三角筋と棘上筋がおもに作用する。肩の運動は、これらの多くの筋群による協調・拮抗運動によって実現される。

3 肩運動シミュレータ SKN-1B

3.1 シミュレータの構成 肩運動シミュレータは、肩関節モデル、筋アクチュエータ、制御用コンピュータの3つから構成される。ヒトの肩関節の解剖学的な構造に近づけるために、肩関節モデルは、上腕骨と肩甲骨からなる教育用骨模型とした。その関節部は、運動中の摩擦を軽減するために、上腕骨骨頭をアクリル、肩甲骨関節窩（ソケット）をテフロンで置換した。肩甲骨は、フレームに固定されており、上腕骨のみが動作する。運動開始前に、上腕骨の初期姿勢を常に一定とするために、上腕骨を位置決めするジグを利用した。上腕骨にアクリル製の角棒を取り付け、シミュレータの土台にアルミ製の固定ジグを取り付けた (Fig.1)。

上腕骨の重量は、手、前腕、上腕を加えた重さ 4[kg] (体重 80[kg]×0.05)⁷⁾の約 10 分の 1 となるように、教

育用骨模型である上腕に重りを取り付け、442[g]とした。重りは、重心の肘関節近くに設定するため、重りを上腕骨の肘関節近くに取り付けた。

3.2 筋アクチュエータ 筋アクチュエータは、ワイヤ駆動型であり、三角筋、棘上筋、棘下筋、肩甲下筋、大胸筋、広背筋を表現した。ただし、三角筋は、その機能から前部、中部、後部の3つとした。合計 8 個の筋アクチュエータを用いてシミュレータを駆動する。筋アクチュエータは、DC サーボモータと、プーリ、ワイヤから構成されている。ヒトの筋の収縮メカニズムを再現するために、筋の感覚器として、ワイヤ長を検出するロータリーエンコーダとワイヤ張力を検出する張力センサが組み込まれている。筋アクチュエータの制御には、感覚器からのフィードバックにより、筋の長さや剛性を任意に変更できるインピーダンス制御を用いた⁸⁾。

4 肩運動シミュレータ SKN-1B の学習制御

4.1 ニューラルネットワークによる姿勢推定 上腕骨の姿勢は、ニューラルネットワークを用いて、8 本の筋アクチュエータのワイヤ長から推定した。上腕の姿勢は、挙上/降下、水平内/外転、内/外旋の 3 自由度とした。学習データは、入力値となる筋アクチュエータのワイヤ長と、出力値となる上腕の姿勢とした。手動で上腕骨を様々な姿勢に動かし、そのときの上腕骨の姿勢をモーションキャプチャ・システム (ProReflex MCU240, Qualisys Sweden) を用いて 240 秒測定した³⁾。同時に、ワイヤ長も記録した。測定周波数は、200[Hz]とした。学習は入力値、出力値それぞれ合計で 48000 データを用いた。ニューラルネットワークの学習は、バックプロパゲーションを用いた。開発言語は、Matlab (MathWorks)とした。

4.2 挙上/降下運動の学習制御 従来の制御^{3,4,5)}では、教示信号に近く滑らかな余弦波を、筋アクチュエータの駆動信号としていた。そこで、余弦波を基本信号として、その振幅を学習制御する。目標とする運動を達成するためには、現在の運動と目標とする運動の差を検出する必要がある。そこで、4.1 に示した手法で、上腕骨の姿勢を推定する。現在の運動と目標とする運動の比較のタイミングは、挙上角が最大になる時点とした。その差を基に、8 本の筋アクチュエータの駆動信号を更新する。その変更タイミングは、上腕骨が挙上/降下して、初期姿勢に戻った時点とした。

5 実験

実験では、学習制御により、シミュレータの目標とする運動を再現する。目標とする運動は、肩甲骨面内に沿った上腕挙上/降下運動とした。そこで、まず肩甲骨面に沿った平行な板に沿って挙上角度 60 [deg]になる地点ま

で挙上させた。さらに、この地点における、初期姿勢からのワイヤ長を測定した。また、そのワイヤ長から 4.1 の方法を用いて水平内/外転角を推定した。この挙上角度 60[deg]における、上腕骨の挙上角と水平内/外転角を目標角とした。シミュレータの制御には、LabVIEW7.1 (National Instruments, USA)を用いた。

運動中の上腕骨の姿勢変化をモーションキャプチャ・システムで測定した。その測定周波数は 200[Hz]とした。また各ワイヤの張力も同時に測定した。運動開始から挙上/降下し、元の位置に戻るまでを 1 サイクルとし、1 サイクルは 15[s]とした。測定時間は、180[s]とし、連続で 12 サイクルを測定した。

6 結果

上腕骨の挙上角と水平内/外転角を Fig.4 に示す。横軸は経過時間[s]、縦軸は角度[deg]を表す。Fig.4 より、1 サイクル目の最大挙上角は、35[deg]である。2 サイクル目から 6 サイクル目にかけて、最大挙上角は、徐々に増加して 60[deg]に近づく。また 6 サイクル目から 10 サイクル目までは、最大挙上角が安定して、かつ、水平内転方向の運動が抑制されている。10 サイクル目以降は、運動にほとんど変化はみられない。

Fig.5 は、挙上運動が安定した 12 サイクル目の各ワイヤに加わる張力を示す。挙上角度が増加するにつれて、三角筋中部、棘上筋が大きく増加した。水平内転方向に作用する三角筋前部と、水平外転方向に作用する三角筋後部と棘下筋も挙上するにつれて増加し、拮抗していた。降下時には、水平内転方向に作用する大胸筋と、それと拮抗する三角筋後部の張力が拮抗したが振動していた。

7 考察

学習制御により、挙上/降下方向、水平内/外転方向に関して目標とする運動を実現できた。また 10 サイクル目以降、安定した運動をしていることから、学習が収束したことがわかる(Fig.4)。

次に、張力について述べる。挙上にもない三角筋中部と棘上筋の張力が線形に大きく増加している。これは、生理学的に妥当な結果といえる。

最後に、大胸筋と三角筋後部の張力の振動について考察する。運動中に挙上角のピークを向えてから、上腕骨の姿勢が一定となる期間がある。このとき、水平内/外転方向に大きく関与する筋である大胸筋と三角筋後部のワイヤ張力が増加している。これは、シミュレータの関節部の摩擦が大きく、肩が降下し難いためと考える。開始時に、これらの増加したワイヤ張力が急にリリースされて、振動したものと考える。今後は、関節部の摩擦の軽減と、挙上/降下ごとに適切な駆動信号を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Ranjan Gupta et al, J Shoulder Elbow Surg, **14**(1S), 105S-110S, 2005.
- 2) Maria Apreleva et al, J Shoulder Elbow Surg, **9**(5), 409-417, 2000.

- 3) 小菅昇司,他, 信学技報, **MBE2005-99**, 29-32, 2005.
- 4) 糸谷友貴,他, 信学技報, **MBE2007-8**, 29-32, 2007.
- 5) 森山賢一,他, 信学技報, **MBE2006-12**, 45-48, 2006.
- 6) 信原克哉: 肩その機能と臨床 3rd, 医学書院, 2001.
- 7) David A. Winter: Biomechanics and motor control of human movement, third Edition, WILEY, 2005.
- 8) 林豊彦, 他, バイオメカニズム **16**, 167-181, 2002.

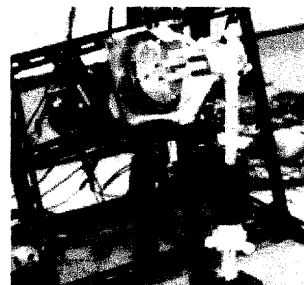


Fig.1 Shoulder movement Simulator, SKN

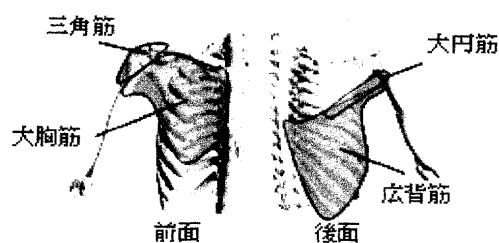


Fig.2 Outer muscle

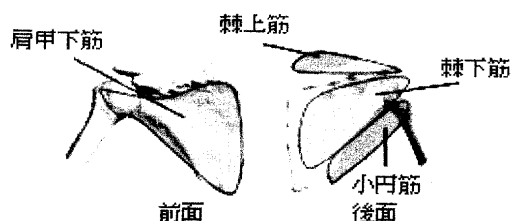


Fig.3 Rotator cuff

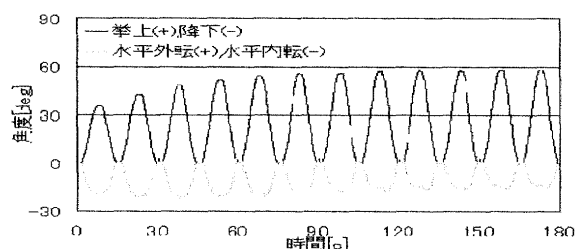


Fig.4 Shoulder movements

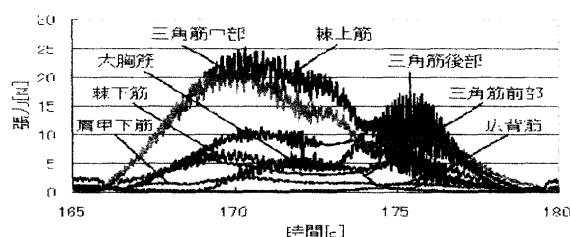


Fig.5 Wire tension at 12 cycles