

無線加速度センサによる上腕関節可動域の測定手法

A Measurement Method for the Range of Upper Limb Motion Using a Wireless Accelerometer

橋本涉^{1) 2)} 田村紘之¹⁾ 野間春生²⁾ 多田昌裕²⁾ 小暮潔²⁾

Wataru HASHIMOTO, Hiroyuki TAMURA, Haruo NOMA, Masahiro TADA and Kiyoshi KOGURE

1) 大阪工業大学 情報科学部

(〒573-0196 大阪府枚方市北山 1-79-1, whashimo@is.oit.ac.jp)

2) 国際電気通信基礎技術研究所 知識科学研究所

(〒619-0288 京都府「けいはんな学研都市」光台 2-2-2)

Abstract: This paper proposes a handy method to measure the range of upper limb motion by using both a 3-axis wireless accelerometer and a 3-axis wireless gyroscope. An accelerometer is used to measure the forward and lateral flexion of shoulder joint. A gyroscope is applied for estimating the horizontal motion of upper limb. This paper evaluates the accuracy of the proposed measurement method compared with a traditional 3D optical motion capture system.

Key Words: Upper Limb, Range of Motion, Wireless Accelerometer, Wireless Gyroscope

1. はじめに

鍼灸やマッサージ, 理学療法, セラピーなどの治療では, 治療効果の客観的な判断が難しい. 治療を受けたという事実から, 実際には効果が小さいのに, あたかも症状が軽くなったかのように感じることも珍しくない. 治療行為による心理的な効果の是非についてはともかく, 治療の効果を客観的に判断し, 定量的な尺度として評価することが重要である.

治療の対象が関節であるとき, 治療の効果を客観的に判断する方法として, 治療前と治療後の関節可動域を数値的に比較することは, 有効な方法の一つである. 関節可動域を測定する一般的な方法は, 角度計などを利用し, 患者の自動的あるいは他動的な運動を観察することである. しかし, 屈曲運動時に痛みを伴う場合や, 力の加減ができない場合, 正確な可動域を測定できないのが問題である. また, 日常生活のふとした動作がきっかけで, 思わず腕が挙がってしまった, というようなこともある. 患者の思い込みを排除し, また患者に意識させずに測定をおこなうことは, 正確な治療効果の判断のみならず, 異常を検出や予防にとっても重要な意味を持つ.

本研究では関節可動域を日常的に測定することを想定し, 大掛かりな装置を使わず, 被測定者への負担が少ない方法として, 無線小型加速度センサと角速度センサを利用する方法について説明する. ここでは, 四十肩, 五十肩など症例の豊富な上腕肩関節をターゲットとした, 関節可動域の測定について述べる.

2. 従来の代表的な測定手法

人間の運動を定量的に測定するための代表的なシステムとして, モーションキャプチャが挙げられる. モーションキャプチャには, その測定原理から光学式, 磁気式, 機械式, 慣性式に分類できる. 一般にモーションキャプチャは大掛かりであり, 本研究の目的にそのまま適用するのは難しい. ここでは各種の測定原理について整理し, 測定方法について考えてみる.

(a) 光学式

反射マーカを人体に配し, 複数のカメラでマーカの位置を撮影して位置を測定するものである. 被測定者にはマーカの着用を強いられるが, 物理的な拘束は極めて小さく, 無意識下で測定するのに適している. その反面, 広い測定空間が必要となり, 測定場所を限定してしまう. また, 高い精度を得るためには, 測定のたびに微調整が必要となる.

(b) 磁気式

磁気センサを人体に配し, 磁場のソースからの距離を磁気の強度から測定するものである. 測定空間は, ソースから磁場信号の届く範囲でなければならない. 磁場に干渉する機器や金属があると, 測定精度が著しく低下する. 被測定者は磁気センサの着用を強いられる. 磁気センサ自体は小型軽量が, ケーブル類の取り回しが難しく, 運動を制限することになる.

(c) 機械式

人間の骨格に沿ってゴニオメータなどの角度計[1]や光ファイバ[2]を配し, 関節の運動を物理的に直接測定する

ものである。外骨格型の装置を着用しなければならず、被測定者の運動を著しく制限し、重量による負担も大きい。測定精度は高く、測定空間にも依存しない。リハビリや介護など、測定者に外力を加える必要がある場合、有効な測定方法である。

(d) 慣性式

小型の加速度センサと角速度センサ、地磁気センサなどを組み合わせ、被測定物の傾斜角を測定するものである。センサの種類は多いが、センサの小型軽量化が進んでおり、被測定者への負担が小さい。コンパスは地磁気の影響を受けやすいが、測定空間に対して制限はない。ただし、センサの角度は加速度センサによる重力加速度、角速度センサの積分値、地磁気センサの値を総合して算出するため、複雑な計算が必要となり、測定精度とサンプリングレートがトレードオフになる。

被測定者に意識させず測定するには、光学式や慣性式のような、装着時の影響が小さな方式が好ましい。また、測定場所を選ばず、こぢんまりと測定するには、機械式や慣性式がふさわしい。ここでは慣性式による測定方法に着目し、さらに計算量を減らすための工夫について考える。

3. 上腕肩関節可動域の測定

3.1 提案する測定手法

上腕の基点である肩関節には、体に対して前後方向、側方向、自転方向の合計3自由度を持っている。このうち、上腕の自転軸の運動を考慮しなければ、前後方向の回転、左右方向の2自由度に分解することができる。さらに、被測定者が関節に何らかの問題を抱えていると想定し、激しい運動については測定の対象としないという条件であれば、加速度センサだけで上腕の前後、左右2軸の回転を測定することが可能となる。ここで問題になるのが、上腕を動かしても重力加速度が変化しない場合である。たとえば、上腕を水平に保った状態で水平面上を運動すると、重力加速度の変化は生じないため、回転運動を検出することはできない。激しい運動を許すのであれば、加速度から角度を推測することも可能であるが、重力による加速度と運動による加速度の分離が困難であること、2回積分の必要があることから、測定に必要な精度が得られない。

そこで本研究では水平面の運動に対しては角速度センサの利用を考える。角速度を高速に測定し、積算によって角度を求めることで、重力加速度によらない運動を検出することが可能である。ただし、この方法では測定誤差も一緒に積算されるため、時間経過とともに誤差が大きくなることになる。そこで、特定の条件を満たした場合に積算結果をリセットする。類似する手法では、地磁気センサと加速度センサを用いて、3軸の参照軸を取得し、リセットをおこなう製品がいくつか販売されている[3][4]が、ここでは上腕を測定するという想定しており、上腕はいずれ身体の中心軸に沿っている状態（基本肢位）になる、という前提で、そのタイミングで積算結果をリセットする方

法をとる。要するに、上腕が重力方向に向いていることを加速度センサで検出し、角速度センサの積算をリセットするわけである。本研究では、上腕肩関節に問題を抱えている人を測定の対象としており、基本肢位が頻繁に生起することが期待できる。したがって、被測定者の楽な姿勢で積算をリセットすることは、被測定者に測定を意識させないという面からも都合がよい。

3.2 提案する測定手法の実装

上腕の加速度を測定するものとして、小型無線加速度センサ(WAA-001, ワイヤレステクノロジー株式会社) [5]を利用した。また、角速度を測定するものとして、ジャイロセンサ WAA-002 を使用した。WAA-002 の主な仕様は表1の通りである。このセンサは加速度センサと同様に、BluetoothでPCと通信が可能である。本体に2軸角速度センサが内蔵されており、これに1軸角速度センサを内蔵したユニットを接続することで、3軸の角速度センサとして使用することができる。加速度センサとほぼ同じ外形であり、加速度センサと同じ位置にサポータで固定することができる。

表 1 3軸ジャイロセンサモジュールユニット WAA-002

サイズ	2軸ジャイロセンサユニット	幅 36.5mm × 高さ 39mm × 奥行 10mm
	1軸ジャイロセンサユニット	幅 22mm × 高さ 26mm × 奥行 10mm
	全長	幅 36.5mm × 高さ 65mm × 奥行 10mm
重さ	21.5g	
内蔵センサ	ジャイロセンサ(エプソントヨコム製 XV-3500CB)	
	基準電圧	3V
	感度	0.67mV/dps
	分解能	10bit
	最小計測	4.37dps
	検出範囲	±300dps

加速度、角速度センサは、運動の妨げにならないよう、上腕肘より 2~3[cm] 上方にサポータで固定することにした(図1)。サポータの固定はマジックテープ式で、一人で取り外しが容易なものである。

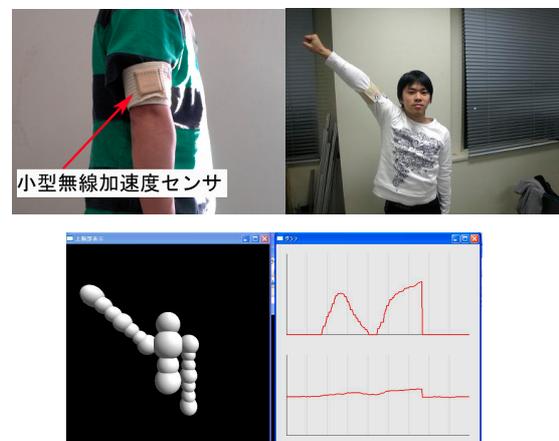


図 1 加速度センサの配置と測定システム

上腕肩関節の前後（屈曲・伸展）の状態、左右（外転・内転）状態は、加速度センサの重力加速度成分から算出する。また、肩関節の水平運動（水平屈曲・水平伸展）は、3.1の方法により、角速度センサによって算出する。角速度の積算結果は、上腕が真下になればリセットするのだが、体型によっては基本肢位状態で外側に10度程度開くこともあることから、真下から10度の範囲に入ればリセットされるようにしている。

4. モーションキャプチャシステムとの測定比較

4.1 測定環境

本研究での測定手法を他方式と比較するため、光学式モーションキャプチャと同時に上腕運動を計測し、測定値の比較を行った。使用したモーションキャプチャは Eagle Digital RealTime System[6], EVaRT3.2(Motion Analysis社)である。このシステムでは各マーカの3次元位置を毎秒50回、30秒間測定することができる。そこで、被測定者の右腕に小型無線加速度センサと角速度センサを装着し、センサの上にマーカをとりつけることにした(図2)。右肩のマーカとセンサ上のマーカの位置に基づいて、上腕の角度を算出する。なお、小型無線加速度センサと角速度センサのデータ取得回数は、毎秒25回とした。



図2 モーションキャプチャシステムと無線小型センサの取り付け位置

4.2 上腕を前後方向に振る運動時の比較

加速度センサのみで、どの程度正確に測定できているかを調べるため、上腕を前方向に90度だけ伸ばし（前へならえ）元に戻すのを30秒間繰り返した場合を比較してみた。結果を図3に示す。グラフはほぼ重なっており、加速度センサからおおむね正しい角度を求めていることができています。角度の極大時には、加速度の影響を受けて、最大で10度程度の行き過ぎ量があることがわかる。開始時に角度が0度にならないのは、上腕が身体を中心線上にあるにも関わらず、加速度センサの計測軸が真下を向いていないからである。なお、腕を側方向に90度だけ伸ばす運動においても、同様のオーバーシュートがあり、この運動と同じ傾向を示すことがわかった。

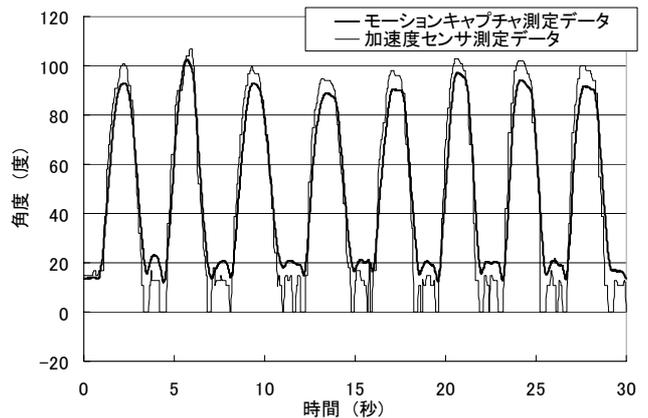


図3 上腕を前方向に90度運動した場合におけるモーションキャプチャと無線小型センサの測定比較

4.3 上腕を水平方向に振る運動時の比較

重力加速度が変化しないケースとして、上腕を水平に振り続ける運動について試みた。図4は腕を肩のラインに沿って真横に上げた状態から、前方向に90度だけ伸ばし、真横に戻すのを30秒間繰り返した場合の測定結果である。角速度センサによる水平面での回転角測定の正確さを調べる。角速度センサで測定した結果は、測定開始から6秒ほどはモーションキャプチャの測定結果とほぼ一致している。しかし、動作を繰り返すごとにモーションキャプチャでの測定結果との誤差が広がっていった。この結果では30秒の間に6回腕を水平に振ったところ、誤差は最大で約50度まで広がった。これは角速度の積分によって角度を求めていることに起因しており、積分定数を0にする条件となっている、腕を真下に下ろすという動作が含まれていないためである。

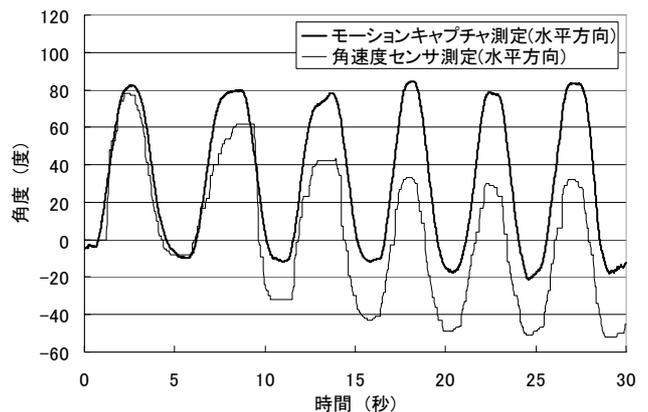


図4 上腕を前に出して水平方向に90度旋回運動した場合の測定比較

4.4 上腕を前後方向+水平方向に振る運動時の比較

上腕の水平運動を角速度センサでどれくらい正確に測定できているかを調べるため、上腕を前方向に90度伸ばし（前へならえ）、次に水平方向に90度開いて、前に戻し、上腕を下ろすという運動を30秒間繰り返した。結果

を図5に示す。前後方向の運動は加速度センサによって角度を求めているが、4.2と同様、グラフはほぼ重なっており、加速度センサからおおむね正しい角度を算出できていることがわかる。誤差も約10度の範囲にとどまっている。一方、水平方向の運動では、モーションキャプチャでの測定結果と角速度センサでの測定結果の間にやや大きな誤差が見られる。ただし、6秒付近、13秒付近、24秒付近で上腕を下ろした状態になり、誤差がリセットされているのがわかる。4.3では腕を水平方向に4回振った時点で約50度の誤差が生じていたことから、基本肢位をとったときに積算結果をリセットするという手法によって、誤差は軽減できているといえる。

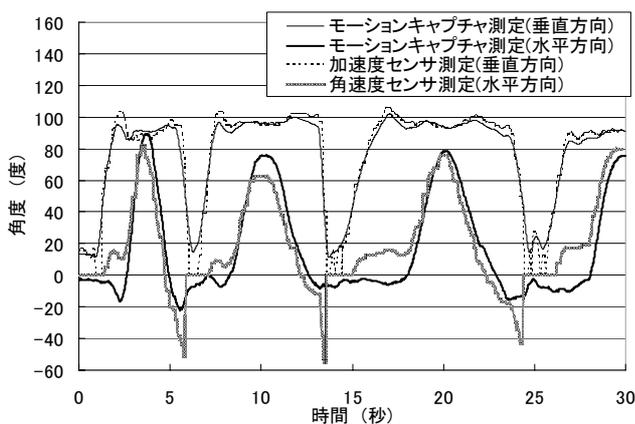


図5 上腕を前方に90度伸ばし、横に90度旋回させ、前に戻し、下ろすのを繰り返した場合の測定比較

4.5 考察

加速度センサを用いた角度測定では、運動方向が変化するなどにより大きな加速度が測定部分にかからない状態であれば、垂直方向の上腕角度を正確に測定することができる。ただし、腕の運動が激しい場合は行き過ぎ量が生じ、正しい測定が行えない。今回の測定では、垂直方向の上腕運動は加速度センサのみによって測定したが、より精度を高めるためには角速度センサの値も積極的に利用すべきである。

角速度センサは、重力加速度に影響しない水平方向の運動を測定するのに用いた。水平方向の運動は角速度を積分することで求めているため、一度誤差が含まれてしまうと、基本肢位になるまで、誤った数値のまま角度に誤差が含まれ続ける。このため、基本肢位を避けた運動を続けると、次第に誤差が広がっていくこととなる。

5. おわりに

上腕の肩関節可動域を無線で簡易的に測定する方法として、小型無線加速度センサにより垂直方向の角度測定、角速度センサにより水平方向の測定を行なう手法について述べた。モーションキャプチャほど正確な測定はできないが、加速度センサによる測定は、現時点では約10度の

誤差範囲で測定できることがわかった。本研究では上腕肩関節に問題を抱えている人を測定対象としており、激しい運動を想定していない。激しい運動にも対応させるには、すくなくともオーバーシュート時の測定精度を改善する必要がある。今回の計測では、加速度センサと角速度センサによる測定をそれぞれ独立した事象として扱い、角速度のリセット以外は関連がないものとして扱った。しかし、これらのセンサ情報を適切に統合し、あるいはセンサを複数利用することにより、高精度測定が目指せるはずである。また上腕の可動域は前後左右非対称であり、関節の取りうる角度が決まっているなど、解剖学的観点から測定精度を改善していくという可能性もある。

角速度センサによる水平方向の測定は、定常的な誤差があるものの、20度程度の誤差で測定できることがわかった。ただし、角度の算出には積分を用いており、基本肢位で積算をリセットしていることから、基本肢位をとらなければ際限なく誤差が蓄積していくことがわかった。肩関節に問題がある場合、実験のように水平に腕を旋回し続けるという不自然な姿勢が連続して起こるとは考えにくいですが、例えば、からだ全体が横たわった場合には、基本肢位をとっても検出できないことになる。胴体の位置姿勢を別のセンサで検出し、からだ全体がどのような状態か調べ、胴体に対する上腕の可動域を測定することが重要である。

小型で無線のセンサによる測定は、きわめて簡便であり、長時間の測定も負担にならず、測定を意識させないものである。このような記録が可能になれば、関節炎などの判断のみならず、日常的な運動の記録やカロリー計算、作業などの記録など、さまざまな応用が期待できる。

謝辞 本研究の一部は情報通信研究機構の研究委託により実施したものである。

参考文献

- [1]META Motion, Gypsy6 Motion Capture System, <http://www.metamotion.com/>
- [2]Measurand Inc., ShapeWrapIII, <http://www.motion-capture-system.com/shapewrap.php>
- [3]NEC トーキョー社製3Dモーションセンサ, <http://www.nec-tokin.com/product/3d/index.html>
- [4]InterSense Inc., InertiaCube2/3, <http://www.isense.com/>
- [5]R.Ohmura, F.Naya, H.Noma, K. Kogure: B-Pack: Bluetooth Based Wearable Sensing Device for Nursing Activity Recognition, in Proc. of the First International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC2006), 2006
- [6]Eagle Digital RealTime System, <http://www.motionanalysis.com/html/movement/eagle.html>