

無線加速度センサを用いた頭部運動の計測 Measurement of Head Motion Using Wireless Acceleration Sensor

森本 泰子* 西野 隆典† 宮島 千代美* 北岡 教英* 武田 一哉*

Yasuko MORIMOTO Takanori NISHINO Chiyomi MIYAJIMA Norihide KITAOKA Kazuya TAKEDA

1. はじめに

人は日常の中で音を聞き取る際、無意識のうちに音のする方へ頭部を動かしている。そのため頭部運動により音像の前後誤判断や定位誤差が減少することが確認されている [1]。一方、音像を自由に制御できる再生方式として立体音場再生システムがある。音像定位と頭部運動の関係から、立体音場再生システムにおいて音像が頭部運動に伴って変化することで、さらなる立体感の向上につながるかと考えられている。そのためにはまず頭部運動情報の取得が必要であり、頭部運動の解析がさまざまなアプローチで行われているが、それぞれに利点と欠点がある。例えばカメラや赤外線による画像データを利用した動作検出 [2] では人が機器を装着する必要はないが、使用場所が限定されるなどの制約がある。また画像以外の手法として、位置センサ [3] や角度センサ [4] を用いた解析も行われている。これらのセンサを用いれば、より自由な状態で絶対的な位置や姿勢を計測することが可能だが、センサ自体の大きさやコストの面で未だ問題がある。

そこで、より実用性の高い計測機器を使用した頭部運動の解析方法を検討する。計測する物理量として従来用いられている位置ではなく、人間の意志を直接的に表現するとされる加速度を考える。人間の加速度情報を利用した研究では、姿勢や動作を識別する状態推定 [5] などが行われているが、本研究で対象とする頭部運動は動作が限定されているため、より詳細な運動解析が可能と考えられる。また加速度センサは小型かつ安価であり実用向きといえる。これらより、無線加速度センサを用いた頭部運動の解析を本研究の目的とする。しかし、加速度センサは並進加速度、角加速度、重力加速度などを全て加算して出力する。そのため目的とする加速度以外の影響を考慮しなければならず、これが加速度センサの難点である。例えば水平面上での動作解析の際、重力加速度を除去するためにハイパスフィルタを用いる場合があるが [6]、動作によっては必要とする周波数成分まで除去されてしまう。本稿では頭部運動で生じる加速度を計測し、各動作における加速度の特徴を捉えた動作の検出と内容推定に関する手法を提案する。

2. 頭部運動によって生じる加速度

2.1 人間の頭部運動

人間の頭部について形状を球、運動を3つの回転軸に関する動作と近似する。この動作は図1に示すような、水平面上での回転運動 (yaw)、前後の傾き動作 (pitch)、左右の傾き動作 (roll) である。これら3方向の動作が解析できれば、各動作を統合することで全ての頭部運動の解析が可能と考えられる。なお、頭部の可動範囲について回転運動は左右ともに 80° 、前後の傾き動作は前後合わせて 130° 、左右の傾き動作は左右ともに 45° 程度といわれている [3]。

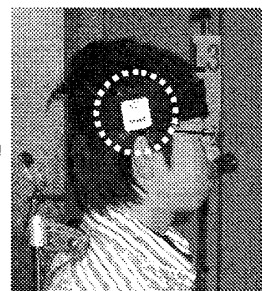
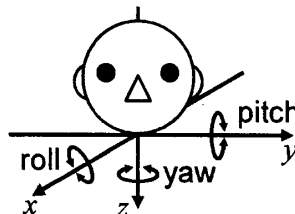


図1: 頭部運動の近似 図2: 加速度センサ装着時の様子

2.2 加速度センサによる頭部運動の計測

加速度センサを用いて頭部運動によって生じる加速度の計測を行った。使用した小型無線加速度センサ (ワイヤレステクノロジー社製 WAA-001) は x, y, z 軸方向の加速度センサを搭載しており、Bluetooth 通信により無線で計測、収録が可能である。また大きさが $38 \text{ mm} \times 39 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、重さが 17 g と人体に装着しても大きな負担とはならない。この加速度センサをマジックテープ付きベルトで右側頭部に装着した。これは動作を行う上で邪魔にならず、センサをヘッドフォンに内蔵して使用することを想定したためである。図2にセンサを装着した様子を示す。

被験者に首から上部のみを動かしてもらい回転、前後傾き、左右傾きという3方向の動作を計測した。回転運動については、被験者が座る椅子を中心とした半径 1.5 m の半円上に $20^\circ \sim 30^\circ$ 間隔で目標物を設置し、指示した目標物の方向へ顔を向ける動作とした。また前後傾き動作では、被験者の右横に角度目盛りを記入した約 1 m 四方の紙、左横には指示者を配置し、被験者の頭部に付けた印と角度目盛りが一致するよう傾き度合を指示した。左右傾き動作は、人間の顔程度の大きさの鏡に角度目盛りを記して顔の正面に設置し、その目盛りと鼻筋を一致させるような動作とした。各動作の移動量は頭部の可動範囲を考慮し、図3(a), (b), (c) に示すような角度を設定した。これらの角度において、例えば回転運動では $0^\circ \rightarrow +30^\circ$ や $+80^\circ \rightarrow -80^\circ$ などといった間隔の動作を計測した。

計測したデータの詳細を表1, 表2に示す。被験者は男性4名であり、全被験者の計測時間は計64分09秒、この時間内で頭部が動作を行った回数は1061回である。各動作時に計測された加速度データの例を図4(a), (b), (c) に示す。図4(a)は正面 (0°) から右回転 (80°)、正面に戻り (0°) 左回転 (-60°)、再び正面 (0°) に戻るという動作である。図4(b)は正面 (0°) から上を仰ぎ見るようになら -80° へ傾き、2段階で角度をゆるやかにする ($-60^\circ, -30^\circ$) という動作である。図4(c)は正面 (0°) から頭をかしげるように左 (-45°) へ傾き、やや角度をゆるやかにし (-30°)、正面 (0°) に戻るという動作である。 1000 mG は重力加速度 9.80665 m/s^2 に相当する。サンプリング周波数は 200 Hz とした。

*名古屋大学大学院情報科学研究科

†名古屋大学情報メディア教育センター

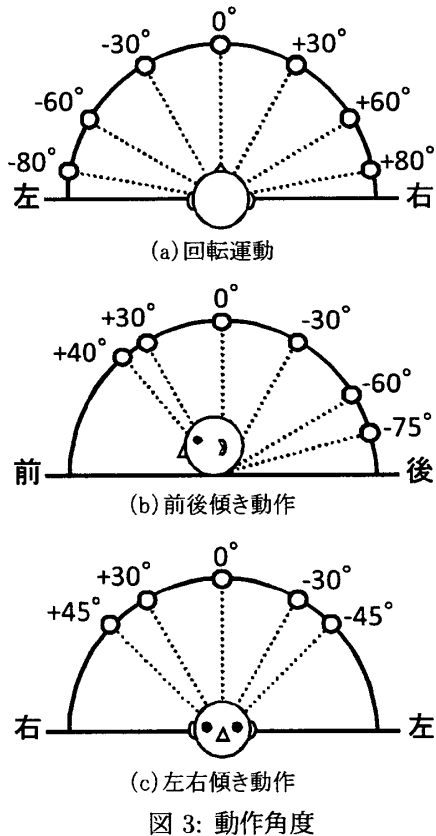


図 3: 動作角度

表 1: 動作ごとの計測内容の内訳

	動作種類	動作回数
回転運動	33 種類	397 回
前後傾き動作	33 種類	412 回
左右傾き動作	20 種類	252 回

表 2: 被験者ごとの計測内容の内訳

被験者	計測時間	動作回数
A	18 分 37 秒	264 回
B	14 分 04 秒	269 回
C	17 分 26 秒	264 回
D	14 分 02 秒	264 回

3. 頭部運動の解析手法

計測された加速度データには、多くの雑音が含まれているため、解析を行う前に FIR ローパスフィルタを用いてデータに含まれる雑音を除去する。雑音除去後、頭部の回転運動と前後傾き動作、左右傾き動作の検出、さらに各動作における回転の方向や角度を推定する。図 5 に概要を示す。

3.1 動作検出

はじめに全データを頭部が地面に対し水平状態か、傾斜状態かの 2 つに分類する。ここで基準値となるのが重力加速度である。計測された加速度データには常に重力加速度が加わっている。水平状態では重力加速度は動作に関わらず一定の軸に一定の大きさで働くが、傾斜状態では重力加速度の影響する軸が動作とともに変化する。そこで水平状態の時に重力加速度と同方向となる軸に注

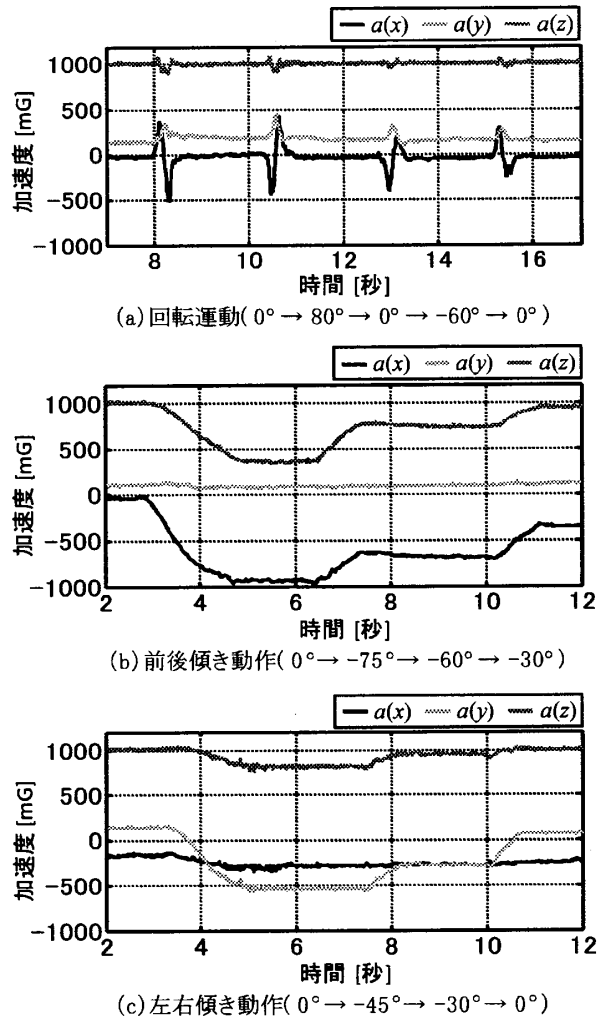


図 4: 計測した加速度データ

目し、その軸の加速度成分の一定区間内における平均値が閾値を下回れば傾斜状態と判別する。後述する評価実験では区間を前後 200 点 (1 秒)、基準とする値を重力加速度の 96% (960 mG) とした。

次に水平状態と判別されたものに対して、回転運動を検出する。静止している間の加速度はほぼ一定の値をとるが、動作中では変化が大きいことに着目し、振幅値にばらつきが大きい区間を動作している区間としてとらえる。ばらつきの度合いとして式 (1) で示される分散値 σ_x^2 を用いる。

$$\sigma_x^2[i] = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \left(a_x \left[i + k - \frac{L}{2} \right] - \bar{a}_x \right)^2 \quad (1)$$

ここで a_x は回転の接線方向の加速度成分、 \bar{a}_x は L 点中における加速度成分の平均値、 i は時刻のインデックスである。加速度データの分散値が閾値以上であれば回転運動が行われているとし、閾値未満であれば静止状態とする。実験では $L = 60$ (0.3 秒) とした。これは計測の結果より頭部が回転運動する時間が全て 0.3 秒以上であったためである。また閾値は $\sigma_x^2 = 102$ と設定した。

一方、傾斜状態での動作中は重力加速度の分解成分に変化が大きいいため、式 (2) で定義される加速度データの

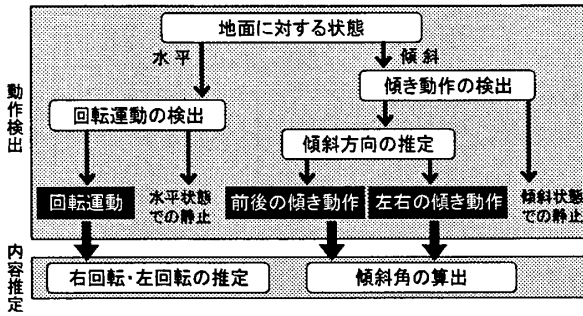


図 5: 解析手法の概要

変化量から動作を検出する。

$$\Delta a[i] = |a[i] - a[i - M]| \quad (2)$$

ただし、 $a[i] = (a_x[i], a_y[i], a_z[i])$ とする。 a_x, a_y, a_z は各軸の加速度成分、 M はサンプル数、 i は時刻のインデックスである。1 軸以上の加速度データの変化量が閾値以上であれば傾き動作が行われているとし、3 軸ともに閾値を下回れば傾いたまま静止しているとする。実験では $M = 50$ (0.25 秒)、閾値を $\Delta a = (20, 10, 20)$ と設定した。さらに検出された区間において、式 (3)、式 (4) を用いて前後および左右に対応する軸での加速度の変化量を求める。その大小を比較し、前後傾き動作と左右傾き動作を判別する。

$$\Delta a_x = |a_x[\text{end}] - a_x[\text{start}]| \quad (3)$$

$$\Delta a_y = |a_y[\text{end}] - a_y[\text{start}]| \quad (4)$$

$a[\text{end}], a[\text{start}]$ はそれぞれ検出区間の終端、始端における加速度成分である。

ただし全ての動作検出において、検出区間が短い場合は誤検出とみなし除外する。実験では計測データから動作にかかる最短時間を 3 方向別に算出し、基準として用いた。

3.2 動作内容の推定

前節で検出された 3 種類の動作について、回転の方向や傾斜角を推定する。まず回転運動が右回転か左回転かの推定をする前処理として、重力加速度を除去する。これは回転運動の際には重力加速度を考慮する必要がないためである。式 (5) に示すように、加速度データをメディアンフィルタに通して得られた出力を重力加速度とみなし、元の加速度データから減算する。

$$\begin{aligned} a[i] &= a[i] - g[i] \\ &= a[i] - \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a\left[i + k - \frac{N}{2}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

フィルタのフレームサイズは $N = 200$ (1 秒) とした。次に加速度を数値積分すると速度が得られるが、実際の加速度データには雑音等が含まれており、積分することでこれらの誤差が累積してしまう。これを軽減するために線形補正を適用する。通常、静止中および動作の開始時、終了時の速度は 0 または非常に微小であるため、その時に速度が生じていれば誤差と考えられ、除去できる。また動作の開始時から終了時までの誤差の傾きは一定とみなし、線形に補正をする。こうして積分、補正により

得られた速度が正ならば右回転、負ならば左回転と推定する。

一方、傾き動作については各軸における重力加速度の分解成分の逆正接関数より、傾斜角を推定する。しかし、動作中の加速度データは静的な重力加速度と動的な運動加速度が加算されたものであるため、正確な傾斜角を算出できない。そこで動作終了時では重力加速度のみが生じているとし、その時点での傾斜角を算出する。前後傾き動作の傾斜角 θ_p は式 (6) より、同様にして左右傾き動作の傾斜角 θ_r は式 (7) より求めた。

$$\theta_p = \arctan \frac{a_x}{a_z} \quad [\text{rad}] \quad (6)$$

$$\theta_r = \arctan \frac{a_y}{a_z} \quad [\text{rad}] \quad (7)$$

4. 評価実験

本手法の有効性を確認するために、動作の検出と内容推定に関する評価実験を行った。その実験方法と結果について述べ、考察する。

4.1 実験方法

動作検出と、さらに正しく検出された動作に対し、回転運動ならば右回転か左回転か、傾き動作ならば傾斜角の推定を行う。使用したデータは前述の計測で得られた加速度データである。ただしセンサ装着時の静止状態における初期傾斜から、各時刻のデータを補正しておく。動作しているという区間の正解ラベルは加速度データを見ながら手作業で付与した。

動作検出における評価尺度を式 (8)、式 (9) のように定義する。

$$\text{再現率} [\%] = \frac{\text{正しく検出した動作数}}{\text{動作数}} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{適合率} [\%] = \frac{\text{正しく検出した動作数}}{\text{検出数}} \times 100 \quad (9)$$

再現率が高いほど検出漏れが少ない、適合率が高いほど過検出が少ない、と解釈できる。

また回転運動における回転方向推定については式 (10) のように正解率を定義する。

$$\text{正解率} [\%] = \frac{\text{正しく推定した動作数}}{\text{正しく検出した動作数}} \times 100 \quad (10)$$

傾き動作の傾斜角に対しては式 (11) のように平均誤差角を定義する。

$$\text{平均誤差角} [^\circ] = \frac{|\text{正解角度} - \text{推定角度}| \text{の合計}}{\text{正しく検出した動作数}} \quad (11)$$

4.2 実験結果および考察

動作検出においては再現率が 83.0%、適合率が 74.9% という結果が得られた。動作別の結果を図 6(a) に、被験者別の結果を図 6(b) に示す。また回転運動における方向推定の正解率は 98.7%、傾斜角推定における平均誤差角は前後傾き動作で 8.5°、左右傾き動作で 7.2° であった。

検出実験における成功例と誤り例を図 7、図 8 に示す。ともに移動角度 30° の回転運動における接線方向の加速度データ a_x と検出に用いた分散値 σ_x^2 である。検出で

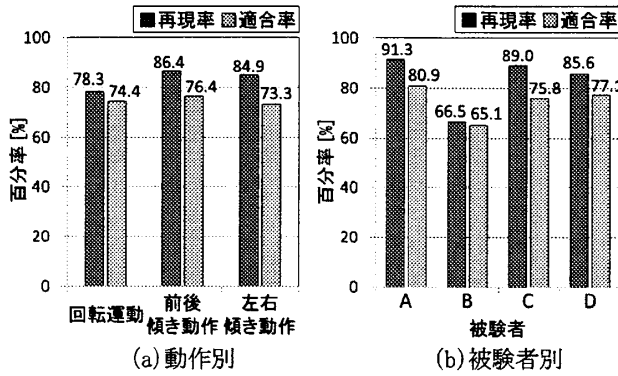


図 6: 動作検出の再現率・適合率

の誤りは図 8 のように動作全体または一部が検出されないというものが最多であったが、動作の一部を他の動作と誤る、動作していない区間を検出する、などの誤りもあった。これらは判別の際に設定した閾値により変化すると考えられる。今回は検出漏れが少なくなるよう再現率を重視し閾値を定めたが、閾値による影響の詳しい調査や、目的とするアプリケーションに応じた閾値の設定が今後必要である。推定実験では、回転運動においてほぼ全ての動作で正解が得られたため、今後は移動角度の推定を検討する。また傾き動作については前後、左右どちらの平均誤差角も計測で用いた角度間隔を下回るものであったため、15°以上の角度間隔であれば問題なく傾斜角が求まると考えられる。

さらに、どの結果にも被験者による差が生じており、特に回転運動の検出において顕著であった。加速度データを見ると、図 7、図 8 のように特定の被験者の振幅値が他と比べ小さく、回転運動時に生じる加速度には個人性があると分かった。運動時の加速度データの振幅値が小さい場合でも、その特徴を抽出できるような処理を検討する必要がある。

5. まとめと今後の展開

本研究は無線加速度センサを用いた頭部運動の解析を目的としている。本稿では加速度センサを用いて頭部運動を計測し、動作の検出および内容推定に関する手法を提案した。計測した加速度データを用いて実験を行った結果、動作検出では再現率が 83.0%、適合率が 74.9%、右回転か左回転の推定における正解率は 98.7%、傾斜角算出での平均誤差角が前後傾き動作で 8.5°、左右傾き動作で 7.2° となり、本手法の有効性が確認された。また頭部運動時に生じる加速度には個人性が現れることが分かった。

今後は個人性を考慮した解析手法の検討や回転運動の移動角度の推定が必要と考えられる。また立体音場再生システムにおける弁別限を考慮した角度推定の精度についても検討する。

参考文献

[1] 木村大助, 鈴木陽一, “音像定位に頭部運動が及ぼす影響に関する考察,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.101, No.251, pp.57-64, Aug. 2001.
 [2] 江尻康, 松坂要佐, 小林哲則, “対話中における頭部ジェスチャの認識,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.102, No.218, pp.31-36, Jul. 2002.

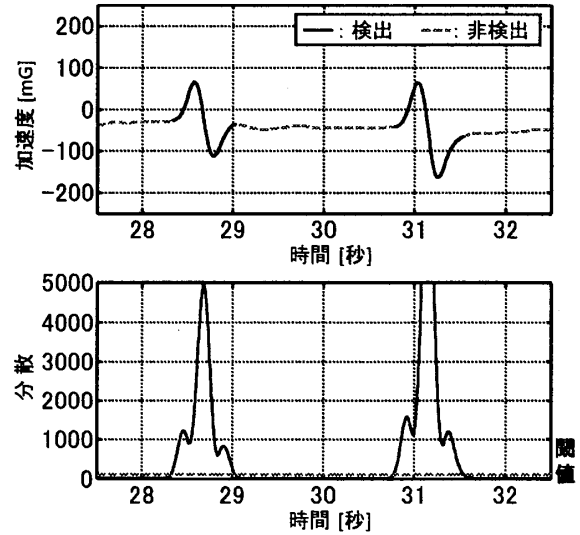


図 7: 検出成功例 (回転運動, 被験者 A)

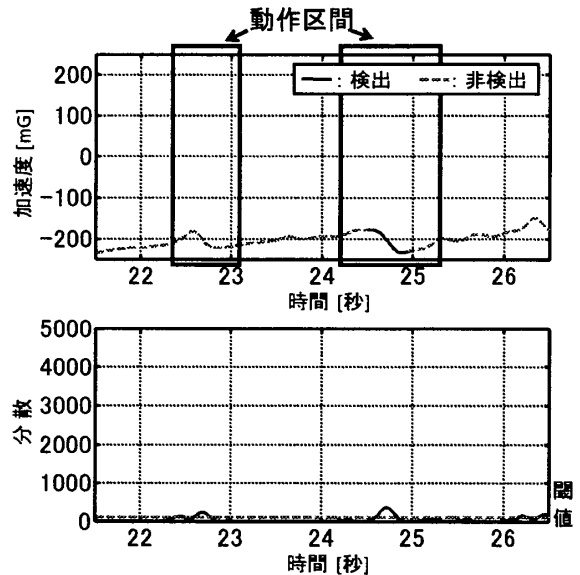


図 8: 検出誤り例 (回転運動, 被験者 B)

[3] 戸嶋巖樹, 植松尚, 青木茂明, 平原達也, “頭部運動を再現するダミーヘッド:テレヘッド,” 日本音響学会誌, 61 巻 4 号, pp.197-207, Apr. 2005.
 [4] 大谷真, 平原達也, “Windows 上で動作する動的聴覚ディスプレイ,” 日本音響学会講演論文集, pp.711-712, Mar. 2007.
 [5] 倉沢央, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀, “センサ装着場所を考慮した 3 軸加速度センサを用いた姿勢推定手法,” 情報処理学会研究報告, UBI, vol.54, pp.15-22, May. 2006.
 [6] 竹之下航洋, 西山健人, 川越雅弘, “携帯型加速度モニタ装置を用いた高齢者の定量歩行評価システム,” 生体医工学, vol.43, No.1, pp.140-150, Mar. 2005.