

ぴたっとキャプチャー ～日常生活で使えるモーションキャプチャーの提案～

甲斐美月[†] 松下宗一郎[†]

概要: 映画やアニメーションにおける 3D-CG 作品制作では、身体の動きを正確に捉えるモーションキャプチャーが広く使われているが、多数のカメラやセンサーを事前に準備しなければならないことから日常生活にて気軽に利用できるものとはなっていない。そこで本研究では利用者が気になっている場所に小型軽量のワイヤレスモーションセンサーを取り付け、3D-CG にて姿勢角の変化をリアルタイムで再生するシステムの検討を行った。センサーの姿勢角を 9 個の数値で冗長表現するモーショントラッキングアルゴリズムを低消費電力マイクロプロセッサにて実装した結果、歩行姿勢といった身体状態の異状を容易に観測することができた。

Pitatto Capture ~ Personal Motion Capture System for Daily Life~

MIDUKI KAI[†] SOICHIRO MATSUSHITA[†]

Abstract: We have investigated a wearable motion capturing system utilizing a single wireless motion sensing device. The proposed system may produce 3D animation video on what the user would like to check while freely varying the point of view. A habit of movement like unfavorable walking posture was easily found by visualizing the motion that the user was interested in.

1. 動機

身体の動きを正確に捉えるモーションキャプチャーの技術は、映画やアニメーションの制作にて利用されており、近年では頭部運動をトラッキングすることによる仮想現実感を用いたコンピュータゲームが市販されている。また、スポーツや楽器演奏といった、ある程度の期間における訓練が必要となるような身体運動が必要となる分野においても、モーションキャプチャー技術の応用が期待されている。ここで、カメラによる映像撮影をベースとするモーション計測を行うことで、各場面へのアノテーションを直感的に行えるという利点が生じる。しかしながら、映像撮影ではプライバシーに関する情報が映り込む可能性があることから、ソーシャルメディアといった不特定多数の利用者との間での情報共有では問題が残ることとなる。

一方、普段の生活における身体の運動の中で、「歩く」という動作はほとんどの人が普段何気なく行っている動作である。しかしながら、内股や蟹股、O脚、猫背など様々な要因により上手く歩けていないと悩んでいる人が少なからずおり、歩き方のチェック方法や、矯正方法等の研究開発が進められている。ここで、歩き方における異常を客観的に知るためには、歩行に関する専門医の診察を受ける必要があるのが現状であり、日常生活における改善の試みの成果を病院外でチェックすることは困難である。そこで、歩行の様子をカメラにて撮影し、全身の動きを 3D グラフィックスにて表現することで、歩きの評価を行う研究が報告されている[1]。しかしながら、カメラを設置するといっ

た事前準備が必要となるため、気になる場所の確認を、いつでもどこでも手軽に行うことは困難であった。このため、歩行において特徴的な運動が見られる部位に加速度センサーや角速度センサーといった運動センサーを取り付け、運動信号を解析することで歩行状況を客観的に分析する研究がなされている[2]。ここでは、実験的な数式による解析から、蟹股等の特徴的な歩行の程度を定量表現できる可能性があることが報告されているものの、様々な歩行フォームに対するロバスト性の確保は困難であると考えられる。

このような状況の中で、近年集積回路技術を用いた MEMS センサーの性能が急速に向上してきており、角速度、加速度、ならびに地磁気センサーを組み合わせた姿勢角計測デバイスを身体の各部位に取り付けた身体装着型モーションキャプチャーシステムが、映画やアニメーションの制作現場にて利用されている。しかしながら、各部位の絶対座標を知るためには、剛体として近似できる身体部位ごとの姿勢角を正確に校正されたモーションセンサーで計測した上で、事前に取得した部位のサイズ情報を元に複雑な計算を行う必要がある。更には、センサーの着脱に要する時間や、システムが高価であることといった理由により、日常生活にて気軽に利用することは困難である。

そこで、本研究ではセンサーの姿勢角変化を相対的に計算し、基準となる視点座標系を自由に変更できるインタフェースと組み合わせることで、レジストレーションといった絶対座標系での使用を前提とする処理を行うことなく、利用者が気にしている部位をピンポイントで観察するインタフェースを考えた[3]。そして、歩きフォームにおいて気になる部位にセンサーを設置し、3D グラフィックスによる動画にて異状を直感的に調べるシステムの検討を行った。

[†] 東京工科大学コンピュータサイエンス学部
School of Computer Science, Tokyo University of Technology

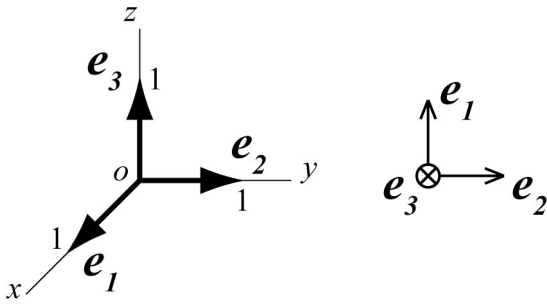


図 1 姿勢角ベクトル e123 の定義
Figure 1 Definition of the e123 attitude vectors

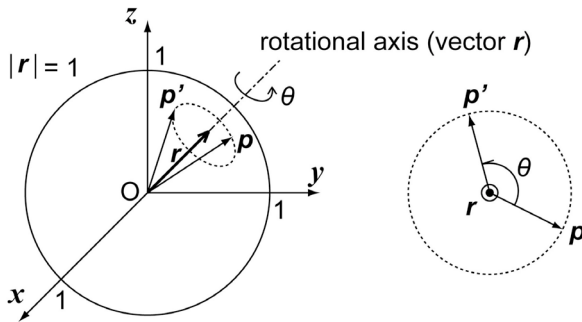


図 2 e123 によるモーショキャプチャーの原理
Figure 2 Principle of the e123 attitude vector tracking

2. モーションキャプチャーアルゴリズム

2.1 姿勢角の冗長表現 ～e123 ベクトルの定義～

角速度センサーからの運動信号を用いたモーショキャプチャーでは、静止直交座標系に対する姿勢角を表現する方法として azimuth, pitch, roll といった 3 つの回転角を用いるオイラー角によるものや、x-y-z 直交座標軸上への射影長（方向余弦：direction cosine）を用いる手法等が知られている。これらの手法では物体の姿勢角を少ないパラメータ数で表現できることや、比較的単純な行列演算にて座標変換を行えることから、モーショキャプチャーの分野において広く利用されてきた。しかしながら、座標変換演算の中では三角関数が多用されており、非力な低消費電力マイクロプロセッサによる実装には必ずしも適したものとはなっていない。そこで本研究では、図 1 に示すような互いに直交する 3 つの単位ベクトル e_1, e_2, e_3 (e123 ベクトル) により物体の姿勢角を表現することを考えた。そして姿勢角をこれらの単位ベクトルの方向余弦にて表し、例えば $e_1 = (e_{1x} \ e_{1y} \ e_{1z})^t$ という列ベクトルを用いる。この結果、物体の姿勢角は合計 9 個の方向余弦成分にて表現されることとなり、パラメータ数の面で冗長度の高い表現となっている。これは、e123 ベクトルを構成する要素が互いに完全には独立ではないことに起因しており、例えば e_3 ベクトルは e_1 ベクトルと e_2 ベクトルの外積 ($e_1 \times e_2$) にて計算される。

2.2 e123 ベクトルの回転写像変換

回転運動を行っている剛体では、ある一瞬について見れば回転軸は唯一でなければならない。角速度センサーの信号をサンプリングする時間間隔 Δt において、回転軸の方向を示す長さ 1 のベクトル r の値が一定であると仮定し、サンプリング時の 3 軸角速度計測値が $(\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^t$ であったとすれば、 Δt 内における回転角度 θ は

$$\begin{aligned} \theta &= (\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2)^{0.5} \Delta t \\ &= \omega \Delta t \quad (\text{ただし, } \omega \text{ は 3 軸の合成角速度}) \end{aligned}$$

にて表される。また、回転軸ベクトル r は静止直交座標系にて回転運動を観測した際の角速度成分により計算され、例えば r ベクトルの x 軸成分である r_x は

$$r_x = (\omega_x e_{1x} + \omega_y e_{2x} + \omega_z e_{3x}) / \omega \quad (\text{ただし } \omega \neq 0)$$

として導くことができる。

ここで図 2 に示すように、原点 O を中心とする長さ 1 の任意のベクトル p について、回転軸ベクトル r 、回転角 θ の回転座標変換を行うと、 p の写像先 p' は

$$p' = (r \cdot p) r + \{ p - (r \cdot p) r \} \cos \theta + r \times p \sin \theta$$

にて計算される。そして、長さ 1 のベクトル p として、 e_1, e_2, e_3 をそれぞれ用いることで、回転運動による姿勢角ベクトル e123 の写像先を求めることができる。この時、回転による座標変換演算にて三角関数の演算を行うのはサンプリング時間間隔 Δt における微小な回転角 θ に対する $\sin \theta$ 及び $\cos \theta$ のみである。また、 θ が 90 度以内であれば $\sin \theta$ の値から $\cos \theta = (1 - \sin^2 \theta)^{0.5}$ として計算することで、浮動小数点演算器を持たない小型マイクロプロセッサが苦手としている三角関数の演算をサンプリング周期あたり 1 回のみとすることができる。この結果、市販の組み込み向け 16 ビットプロセッサ (Microchip Technology 社, dsPIC30F3012) にて、秒速 100 回のサンプリング処理に必要なクロック周波数の下限値を約 8MHz に抑えることができた。

2.3 e123 ベクトルによる姿勢角レジストレーション

姿勢角を 9 つの方向余弦数値にて冗長表現する e123 ベクトルを用いることで、姿勢角座標値のレジストレーション処理が非常にシンプルな計算にて行えるようになる。ここで、e123 ベクトルは $E_{123} = (e_1 \ e_2 \ e_3)$ として表現される 3 行 3 列の行列であるが、e123 ベクトルが持つ性質から、

$$E_{123}^t E_{123} = E \text{ (単位ベクトル)}$$

という関係式が成立する。そして、ある時点を基準として絶対座標系を再定義し、ここからの回転運動分をキャプチャーする歩行運動様態計測のようなアプリケーションでは、単に計測されている e123 ベクトル行列 E_{123} の転置行列 E_{123}^t をそのまま変換行列とすれば良いこととなる。

以上の結果、観測の起点となるタイミングにて計測されている e123 ベクトルの転置行列をレジストレーションの基準とすることで、角速度センサーを用いたモーショキャプチャーシステムの大きな問題点の 1 つである静止ゼロ点の時間ドリフトの問題を軽減することができる。

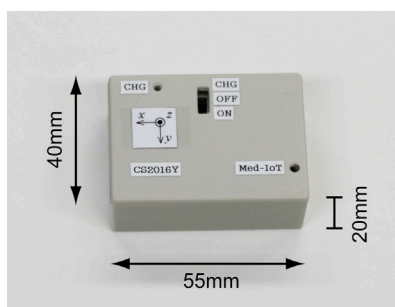


図 3 モーションキャプチャーデバイス
Figure 3 Motion tracking device

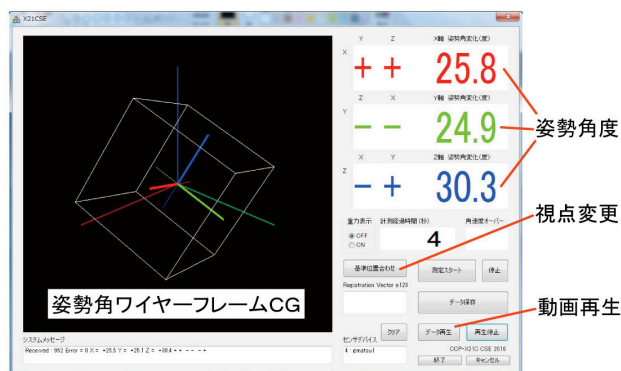


図 4 姿勢角計測アプリケーションの画面
Figure 4 Attitude angle measurement application

3. モーションキャプチャーシステム

図 3 に本研究にて使用したモーションキャプチャーデバイスを示す。幅 55mm、奥行き 40mm、高さ 20mm の ABS プラスチックケースの中に、6 軸モーションセンサー IC チップ (3 軸加速度 $\pm 8G$, $1G = 9.8m/s^2$ および 3 軸角速度 $\pm 1000dps$) 並びに 16 ビットマイクロコントローラ、2.4GHz 帯ワイヤレス通信デバイスが、充電式電池とともに収められている。また、デバイスの総重量は約 50 グラムであり、ベルトや両面テープ等を用いることで、身体の様々な場所に容易に取り付けることができる。一方、デバイスに内蔵された小型マイクロコントローラにて e123 ベクトル表現による姿勢角の計算がリアルタイムにて行われており、ワイヤレス通信にてノート PC 等に座標データが送信される。ここで、e123 ベクトルの性質により、任意のタイミングにて基準姿勢へのレジストレーションが行えることから、原理的にはデバイスへのレジストレーション指示等のデータ伝送は不要である。すなわち姿勢角の演算はデバイス内で完結しており、ワイヤレス通信にてデータ損失が発生しても、受信できたデータにて運動様態の観測を続けることができる。尚、姿勢角の計測精度を市販の磁気式モーションキャプチャーシステム (Polhemus 社, Liberty240) にて確認したところ、動的運動における角度変位の絶対値にて 1 分間あたり約 5 度以内の誤差に収まっていた。

図 4 は、ノート PC 上にて作成した姿勢角観測用アプリケーションの画面例であり、シンプルなワイヤーフレームグラフィックスにより姿勢角の変化をリアルタイムで観測することができる。また、任意のタイミングにて「視点変更」のボタンを押すことで、その瞬間のセンサーデバイス上の座標軸を基準とする 3D-CG 投影へと切り替わるようになっている。更には、モーションキャプチャーデバイスからの姿勢角データを保存した後、「動画再生」のボタンを押すことで 3D-CG による動画投影を行う際にも、任意のタイミングにて「視点変更」ボタンにより表示における座標系を瞬時に切り替えることが可能である。

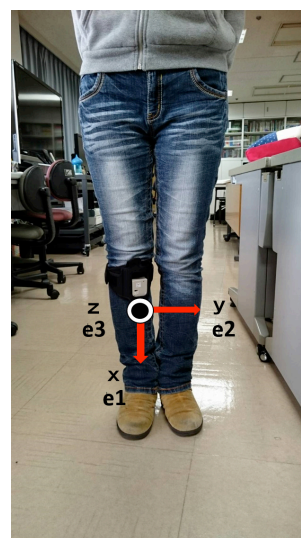


図 5 歩行特徴を観測する実験の様子
Figure 5 Experimental setup for walking motion observation

4. 歩行における運動様態の観測実験

被験者が日常的に気になっている少しおかしい歩き方と、真つすぐに足を動かすことを意識した歩き方のモーションキャプチャーによる観測を試みた。図 5 はデバイスの装着状況を示したものであり、小型モーションセンサーデバイスをベルトにて被験者の右足のひざ下に固定している。ここでは、歩き方がおかしいと感じている被験者が、動きに最も違和感を感じる場所を選択した。また、歩行路は屋内の約 12m の直線路であり、ワイヤレスにてデータを受信するノートパソコンを中央付近に設置した。

実験では、まず最初被験者にデバイスを取り付けた後 3 秒ほど直立静止してもらった。この時、図 5 に示すデバイスの座標系に対してレジストレーションを行うことで、静止時の姿勢を基準とした姿勢角変動を観測することが可能となる。そして往路の約 15 歩は通常通りの歩き方をしてもらい、再び 3 秒程度直立静止してもらった。そして方向転換した後に再び 3 秒ほど直立静止してもらい、真つすぐに足を動かすことを意識して復路を歩いてもらった。また、

取得したデータについては、歩き始めと終わりにおける不規則な運動による影響を取り除くため、最初の1歩と最後の1歩に相当する部分のデータを除外して分析を行った[4].

実験の結果、ひざ下位置から地面へと向かう e_1 ベクトルの動きにて二種類の歩き方の間に何らかの違いがあることが、ワイヤーフレームグラフィックスによる動画再生にて確認された。具体的には、被験者が違和感を感じている歩き方に対しては、 e_1 ベクトルが進行方向から外れた向きへとねじれていく様子が観測されている。ここで、3つのベクトルの方向のみにて運動様態を動画投影する方法では、運動の様子を直感的に理解することが困難となるケースが見られたことから、デバイスが装着されている部位の周囲を模式的にコンピュータグラフィックスにて表示するプログラムを作成し、歩行様態の違いを観測してみることにした。そして、ひざ関節から下の部位が1つの剛体として運動することを仮定するとともに、足が前方へとまっすぐには運動していないことによる一種の「ねじれ」運動を分かりやすく表現するため、 e_1 ベクトルと並行に直方体を配置した。また、足先の部分については表示される図形の直感的な分かりやすさを考え、ひざ下の部位を表す直方体の下方に別の直方体を隣接させる形で配置した。ここで、二種類の歩き方に対するコンピュータグラフィックスの計算結果を、足の踏み出しから地面への着地までをコマ送りする形で描画した結果を図6及び図7に示す。まず最初に、図6に示す復路における真っすぐ足を動かすことを意識した際の描画結果では、踏み出し前と踏み出し後と比較すると上面の青い面が見えなくなっており、足が真上に上がっていることが示唆される。これに対し、図7における被験者が違和感を感じる歩き方に対する描画結果では、踏み出し前と踏み出し後と比較すると上面が斜めに傾いており、接地時も踏み出し前と異なる状態であることから、ひざ下の部位が明らかにねじれて運動していることが分かった。

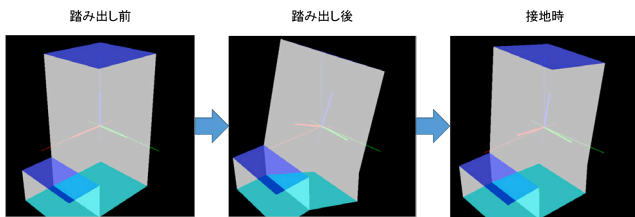


図6 真っすぐを意識した歩行時の足の動き
Figure 6 Foot movement while walking straight

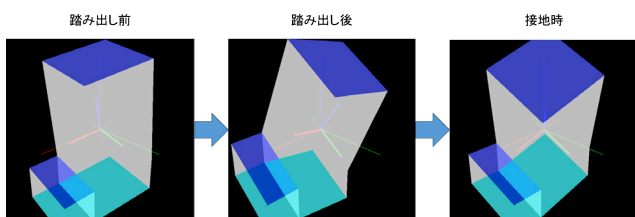


図7 おかしな歩きをしたときの足の動き
Figure 7 Foot movement with leg-twisting motion

ここで、歩行実験を記録したビデオ画像により、被験者のひざ下の部位がどのような運動を行っていたのかを確認したところ、ねじれ運動という視点では、ほとんど同じ運動特徴が見られることが分かった。しかしながら、ビデオカメラによる撮影では、事後に視点を変更することが困難であることから、身体装着型モーションキャプチャーとコンピュータグラフィックス投影を組み合わせる本研究による手法に優位性があるものと考えられる。また、ひざ下の部位のねじり角を観測することが目的であれば、図5に示すセンサー感度軸において、x軸まわりの角速度を計測する方法が考えられる。図8は角速度信号の時間変化をプロットした結果であるが、往路の15歩において角速度が増大していることが分かる。しかしながら、このことは動画像による直感的な状況観測のもとで導かれた視点によるものであり、より複雑な状況においてはモーションキャプチャーを用いることによる効果が顕著となることが予想される。

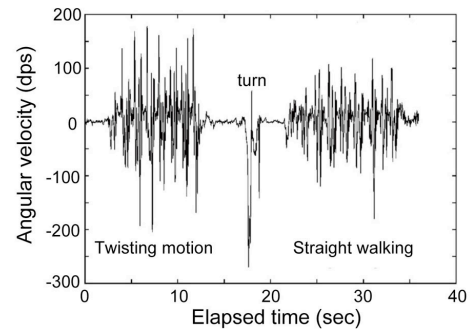


図8 2種類の歩き方によるひざ下周り角速度の比較
Figure 8 Changes in angular velocity around the leg

5. まとめと今後の展望

本研究では原理的には3軸角速度センサーを1つだけ使用するモーションキャプチャーデバイスを作成し、歩行特徴分析への応用を試みた。その結果、カメラ等の外部デバイスを用いることなく、日頃気になっていた異常な足の動きをシンプルなシステムにて可視化することができた。そこで、いつでもどこでも気軽に利用できるという特徴を生かし、日常生活における幅広い分野へのモーションキャプチャーシステムの適用を検討していきたいと考えている。

参考文献

- [1] C. Fookes, S. Sridharan, S. Denman, D. Chen, S. Sivapalan, "3D ellipsoid fitting for multi-view gait recognition", 8th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, pp. 355-360 (2011)
- [2] 細井悠貴, 松下宗一郎: ウェアラブル歩行特徴分析センサに関する研究, 第10回情報科学技術フォーラム(FIT2011), 講演論文集第3分冊 J-048, pp.647-648 (2011)
- [3] 松下宗一郎, 菅野谷知佳, 甲斐美月, 鹿野雄輝: 手首装着型モーショントラッキング機器による精密作業評価, 日本コンピュータ外科学会誌 Vol. 18, No. 4, pp.239-240 (2016)
- [4] 江原義, 山本澄子: 臨床歩行計測入門, 医歯薬出版 (2008)