

歩行計測システムとその応用

Gait Measurement System and its Applications

花 若 増 生^{*1}

HANAWAKA Masuo

沢 村 昌 治^{*1}

SAWAMURA Masaharu

藤 本 直 之^{*1}

FUJIMOTO Naoyuki

佐 藤 明^{*1}

SATO Akira

MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を採用した小型軽量のジャイロセンサーおよび加速度センサーを用いて、足の挙動を3次元で計測できる歩行計測センサーを開発した。更にこの歩行計測センサーに無線送受信機能を持たせることで、歩行時の人の動きをリアルタイムに解析できる歩行計測システムを、ASTREA PMシリーズとして開発した。従来、無線LANなどを使って行われてきた屋内での位置計測では十分な精度と安定性を確保することが困難であったが、本方式では自律型の計測方式を採用することで、無線電波の不安定性を排除することができた。また、歩行時の足の動きをモデル化して効果的にセンサードリフトを除去することで、屋内での使用に必要な精度と安定性を確保することができた。その結果、屋内での移動距離、移動時間、歩行軌跡、移動中の動作状態等のリアルタイム解析が可能になった。このシステムの適用により、工場生産ラインでの正確なタクト管理、省人化工場での安全支援、リハビリ医療での定量的な歩行解析等が可能になるものと期待している。

We have developed a gait measurement sensor which can analyze 3-dimensional foot movements by using a small gyro and acceleration sensor with micro electro mechanical system (MEMS) technology. By adding a wireless communication function to this gait measurement sensor, we also developed a gait measurement system called ASTREA PM Series to analyze people's walking movements in real time. With the conventional indoor positioning method using a wireless LAN, etc., it has been difficult to secure sufficient accuracy and stability. However, by using an autonomous measurement method, our system eliminates radio wave instability. Moreover, sensor drift has been efficiently eliminated by modeling foot movement, thus achieving sufficient accuracy and stability for indoor applications. As a result, we can now analyze moving distance, moving time, foot trace and state of movement in real time. This system will enable correct tact management of factory production lines, intrinsic safety management in automated factories, and quantitative gait analysis for rehabilitation healthcare and so on.

1. はじめに

歩行計測の一部である位置計測は、これまでも様々な方法が試みられてきた。電波、赤外線、超音波を利用するものがあり、それぞれの特長を活かした方式が考案されている。表1には、電波を使った方式の例を示す。共通するのは、3点測量の原理を用いていることである。屋外に限れば、GPSの技術進歩によって数mの精度での位置計測が可能になった。しかし、屋内での位置計測、特に人の位置計測に目を向けると、オフィスや工場内での移動軌跡を簡便に把握できる計測技術が見当たらない。我々は屋内での使用に耐える位置計測を実現するため、慣

性誘導システムで馴染みの深い積分方式の技術を活用することにした。そのため、小型軽量のMEMS (Micro Electro Mechanical System) センサーを搭載した歩行計測センサーを開発し、このセンサーを人に装着することで、加速度積分方式による位置計測を可能にした。その結果、工場やオフィス内での人の位置や移動軌跡の計測だけでなく、足の3次元的な動作解析ができることで様々な応用

表1 位置計測技術の比較

| 方式 | | 誤差 (m) | 基地局との距離 (m) |
|--------|--------|----------|-------------|
| GPS | | 3 - 200 | - |
| gpsOne | A-GPS | 3 - 50 | 2000 - 3000 |
| | TDOA | 50 - 200 | 2000 - 3000 |
| PHS | RSS | 40 - 70 | 200 - 300 |
| | RSS | 1 - 3 | 5 - 10 |
| 無線LAN | TDOA | 1 - 3 | 5 - 10 |
| | RFタグ敷設 | 0.5 - 2 | 0.5 - 2 |

^{*1} SOL事業部 ファシリティ・マネジメント開発部

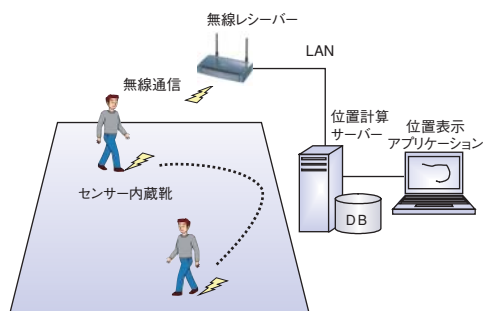


図1 歩行計測システム構成図

が期待できるようになった。本論文では、この計測技術を応用した歩行計測システムの構成、動作原理、応用について述べる。

2. 歩行計測システム

2.1 システム構成

図1に、歩行計測システム（以下、本システム）の構成図を示す。本システムは、人の足に装着する小型軽量の歩行計測センサー、無線送受信を行う無線レシーバーおよび解析用PCから構成される。歩行計測センサーは、足の動きの3次元解析を可能にするため、3個の加速度センサー、3個のジャイロ（角速度）センサーを搭載している。また、無線送受信機能を備え、これら6個のセンサーで検出した計測データを無線でレシーバーに送信する。無線レシーバーは、歩行計測センサーから送信される計測データを解析用PCに転送する。無線レシーバーには、複数の歩行計測センサーを接続することができ、複数の作業者の動きを同時にモニターすることができる。解析用PCでは、取り込んだ計測データから、移動距離を算出し、作業者の歩行軌跡を計算、表示する。

2.2 センシングデバイス

歩行計測に必要なセンサー要素としては、足の3次元空間での動きを計測するため、足を基準にしたXYZ3軸での加速度を測定できる加速度センサー、XYZ3軸それぞれの回転角度を測定するジャイロ（角速度）センサーが必要になる。足に取り付けるため、取り付けたことで歩行動作に支障を与えず、取り付けたことを意識しないで済むような大きさ、重量が求められる。現状この目的に適うものは、MEMS技術で製作された小型軽量のセンサー以外に

表2 センサー特性

| | 加速度センサー | 角速度センサー |
|-----------|-----------------------------|----------------------------|
| 測定範囲 | $\pm 100 \text{ m/s}^2$ | $\pm 5.2 \text{ rad/s}$ |
| 感度 | 9.2 mV/m/s^2 | 38 mV/rad/s |
| 電源電圧 | $2.2 \sim 3.6 \text{ V}$ | $2.7 \sim 5.25 \text{ V}$ |
| 消費電流 | 0.58 mA | 3.2 mA |
| 外形寸法 (mm) | $4.8 \times 4.8 \times 1.5$ | $12.2 \times 7 \times 2.6$ |

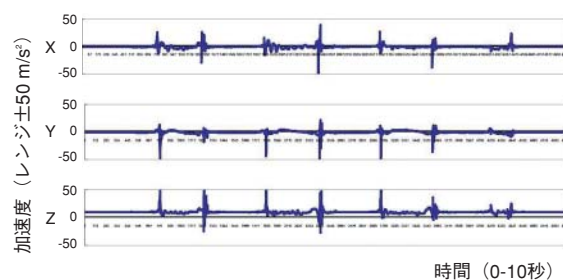


図2 歩行時の発生加速度例

見当たらない。表2には、このようなセンサーの内今回使用したセンサーの特性を示す。

従来航空機や船舶に使用されてきたセンサーと比較すると性能的に大きな差異があり、長時間の測定を行うには安定性に問題がある。この問題は、後述するソフトウェア処理によって回避している。また、通常の歩行時に発生する加速度例を、図2に示す。これらは歩く人や歩き方に依存する部分が大きいため、一般的な例と考えていただきたい。時速4 km以下では加速度で最大 50 m/s^2 程度が発生しており、センサーにはこれで飽和しないようなダイナミックレンジが要求される。

2.3 無線方式

本システムでは、歩行計測センサーと無線レシーバーとの間のデータ通信に無線電波を用いているが、歩行計測センサーが電池動作であることを考慮すると、可能な限り低消費電力が望ましい。低消費電力の無線方式としては、微弱無線、特定小電力があり、消費電力、帯域、通信速度、回路規模等でそれぞれに特長がある（表3）。

しかしながら、本システムが使用される環境を考えると、電波到達距離にして数10 m、通信速度として数百kbpsくらいのものが必要になる。微弱無線も特定小電力も、この要求を充たすことができない。今や広く普及している無線LAN方式ではこの要求を充たせるが、消費電力が大きいこと、回路規模、ソフトウェア規模が大きいため、歩行計測センサーに実装することは困難と判断した。これらに代わるものとして着目したのが、Zigbee方式である。

Zigbee方式は、低消費電力の割に比較的通信速度が大きい。回路規模も小さく、歩行計測センサーへの実装には適している。Zigbee方式は物理層にIEEE802.15.4を採用

表3 無線通信方式の比較

| | 微弱無線 | 特定小電力 | Zigbee方式 |
|---------|----------|----------|----------|
| 周波数 | 300 MHz | 430 MHz | 2.4 GHz |
| 伝送速度 | 2.4 kbps | 4.8 kbps | 100 kbps |
| 到達距離 | 5 m | 500 m | 50 m |
| 消費電力 | ◎ | △ | ○ |
| アンテナ小型化 | △ | △ | ◎ |

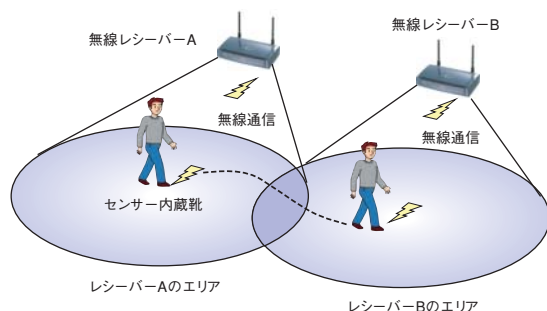


図3 歩行計測でのローミング

し、アプリケーション層まで規定しているが、本システムの目的からは物理層のみを採用し、その上の通信プロトコルは独自方式によるのが最善と判断した。こうすることで、レーザーからレーザーに渡り歩くローミング等も容易に実現することができ(図3)、自由歩行に対応することが可能になった⁽¹⁾。

3. 計測原理

3.1 歩行時の足の動き分析

センサー取り付け位置については、頭から爪先までいろいろ考えられる。一般的に考えれば、腰取り付けが体の重心に近く望ましいと考えられるが、本システムでは爪先を選んだ。その理由は、この種のセンサーに一般的に存在するドリフトを回避するためである。足は他の部位と違って動きが大きく、大きな信号変化が得られる。これが、SN比を改善するのに効果がある。腰取り付けの場合、一般人の普通歩行では信号変化が小さく、センサードリフトと同程度になってしまう。

また、足の中でも爪先は、通常の歩行では必ず着地する。この着地を繰り返しながら前に進んでいくのが通常の歩行である。この一歩毎の周期的な動きをドリフト補正に利用することで、従来は難しかった高精度の移動速度や移動距離の計測を行うことが可能になった。着地時に爪先が静止する時間があることに着目すれば、その時点で加速度、速度等が近似的にゼロであると仮定できる。角速度にも同様の仮定を持ち込むことで、高精度の角度測定を可能にした。

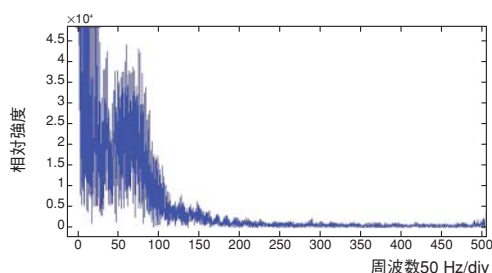


図4 検出加速度のスペクトラム分析

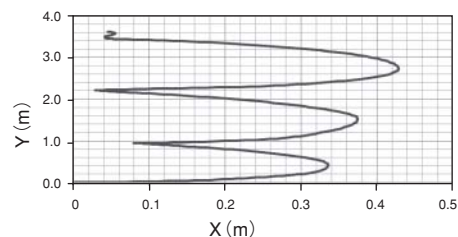


図5 センサーの動きの解析例(XY面図)

3.2 動きの3次元解析

加速度、角速度センサーから得られる6種の計測データから、歩行計測センサーの3次元空間での動きを解析する。図4は、加速度センサーで検出した信号の周波数スペクトラムである。この図から、サンプリング周波数としては250 Hz以上が必要なが分かる。また、センサーは個々の特性バラツキが大きいので、事前に感度、オフセットなどの校正を重力基準で厳密に行う必要がある。この校正値を用いて、計測データの正規化処理をセンサー毎に行う。センサーは移動座標系にあり、足の動きと共に地球座標系から見れば、移動、回転を行う。そのため、解析は加速度、角速度データによる3次元の回転処理が中心になる⁽²⁾⁽³⁾。得られた地球座標系での加速度の時間積分により速度が、また、速度の時間積分により距離が得られる。この時間積分の各段階で、センサーの初期値からのドリフトや積分誤差などを一歩毎に補正する。

このような解析を行った例を、図5、6に示す。図5には、リハビリ医療で分回し歩行と呼ばれる歩行パターンで3歩ほど歩いた場合の右足の軌跡のXY面図を、図6にはYZ面図を示す。X軸が進行方向右手の方向、Y軸が進行方向、Z軸が鉛直方向を示している。この図から、移動距離だけでなく、振り回して歩いている右足の3次元的な動きを定量的に解析することができる。

3.3 解析精度の考察

人の歩行を3次元で定量的に計測することは、そう易しいことではない。しかし、解析精度を求めるためには、何らかの基準が必要になる。我々は、3次元モーションカメラによる解析結果と突き合わせることで、本システムの

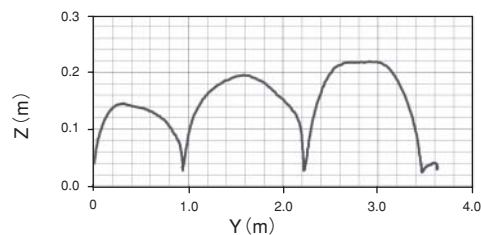


図6 センサーの動きの解析例(YZ面図)

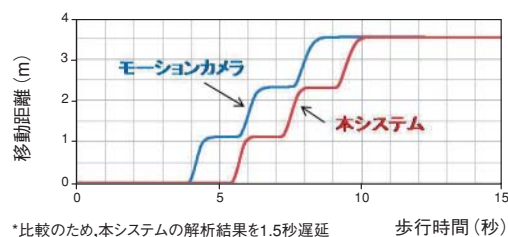


図7 解析結果の比較

解析精度を検証した。3次元モーションカメラは、事前の校正などを厳密に行えば、1 cm程度の精度が期待できるとされている。図7に、3歩歩行した時の時間と移動距離の解析結果の例を示す。この場合の一致度は良いが、他の歩行パターンも含めて、現在解析量の5%程度の精度が出ている。人の歩行は千差万別であり、いろいろな歩行パターンに精度良く対応するには、更なるデータの蓄積が必要である。

4. 歩行計測の応用

4.1 リハビリ医療への応用

本システムの応用として、リハビリ医療における歩行分析がある。従来は10 m 歩行時間と歩数をストップウォッチで測定するか、3次元モーションカメラで解析するしかなく、臨床現場で簡便に歩幅等を計測する機器が存在しなかった。本システムを応用した歩行分析装置では、左右の足それぞれに装着した歩行計測センサー(図8)をマスター・スレーブ動作させることにより、左右独立した歩幅、歩行速度、時間因子等の計測が可能になり、従来難しかった左右で異なる歩幅の片麻痺患者への応用が期待できる。図9に、計測結果の表示画面例を示す。左上に計測データの数字表示、左下に歩毎の左右の足のストライド長、右横に歩行軌跡などを表示した。

4.2 工程管理への応用

2次元の歩行軌跡が時系列として得られることを利用して、工場の生産ラインにおける作業者の移動軌跡と移動時間を計測することができる。生産ラインでの重要な指標として、作業者の設備から次の設備までの移動時間と設備毎の作業時間がある。これらの時間を自動計測する



図8 歩行計測センサーを靴に装着したところ

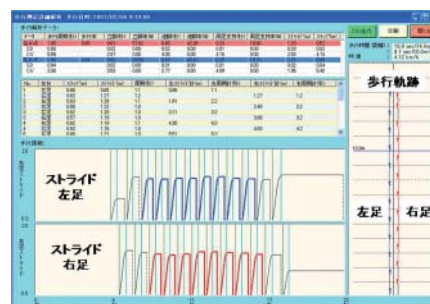


図9 測定結果表示画面

ことで、タクトタイム内で作業者がこなせる作業の「見える化」が可能になる。従来はストップウォッチを使ってピンポイントで測定、作成していた標準作業票や、マン・マシンチャートを本システムで自動計測・作成することで計測数を増やし、1日の作業の中での作業時間のばらつきなど、問題点の解明が行い易い。その結果、熟練者と初心者の違いや初心者の教育・訓練効果の把握等が可能になる。

5. おわりに

歩行計測システムのシステム構成、動作原理と応用について述べた。リハビリ医療の分野では従来から歩行分析の概念はあったが、機器が高価で設置場所を選ぶため研究用途がほとんどであり、臨床現場で使えるものがなかった。本システムであればどこでも測定が可能で、リアルタイムに解析結果が得られるという意味で簡便な計測が可能である。また、工程管理における作業時間の自動計測では、これらの作業効率改善の「見える化」を、足に簡易なセンサーを装着するだけで実現できることが大きな特長である。本システムによって、様々な業務効率改善が進むことを期待したい。

参考文献

- (1) M. Hanawaka, T. Kanamori, Y. Kurihara, M. Hagimoto, T. Kanayama, T. Yokoyama, T. Tomita, "A High Accuracy Real-time Position Sensing System Utilizing Wireless Sensor Networks for Indoor Applications", INSS2006, Rosemont, Illinois USA, May 2006, pp. 132-135
- (2) 佐川, 煤孫, 大瀧, 猪岡, "足爪先加速度積分による歩行経路の3次元無拘束計測", 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 6, 2004, p. 635-641
- (3) 佐川, 佐藤, 猪岡, "水平方向歩行距離の無拘束計測", 計測自動制御学会論文集, Vol. 36, No. 11, 2000, p. 905-915

* 'ASTREA' は、横河電機(株)の登録商標、'ZigBee' は、Koninklijke Philips Electronics N.V.の登録商標です。その他、本文中の製品名及び名称は、各社の商標または登録商標です。