

ウェアラブル RTK GNSS を用いた階段歩行計測 Measurement of Stair Ascent and Descent using Wearable RTK GNSS

○正 宮本 直人^{*1,3}, 正 廣瀬 圭^{*2,3}, 正 竹田 正樹^{*3}
Naoto MIYAMOTO^{*1,3}, Kiyoshi HIROSE^{*2,3}, and Masaki TAKEDA^{*3}

^{*1} 株式会社 大武・ルート工業 Ohtake-Root Kogyo Co., Ltd.

^{*2} 久留米工業大学 Kurume Institute of Technology

^{*3} 同志社大学 Doshisha University

In this study, we utilized the Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System (RTK GNSS) to measure the stride length and cadence of stair ascent and descent. The necessary sensing information required to determine these parameters includes heel contact (HC) time, toe-off (TO) time, and toe position during the stance phase. The HC time can be determined from the altitude of the heel, while the TO time can be inferred from the altitude of the toe. The stance phase can be determined from the speed of both the heel and the toe, and the position of the toe can be ascertained from its latitude and longitude. Consequently, we hypothesized that by using the RTK GNSS to measure both heels and toes, it would be possible to determine the gait parameters of stair ascent and descent. We attached the RTK GNSS to both the heel and toe of snowshoes and conducted a stair gait experiment, measuring trajectories of both the heel and toe. Experimental results confirmed that gait parameters for stair ascent and descent could be determined with high accuracy using the RTK GNSS.

Key Words : Gait, Stair Ascend, Stair Descend, RTK, GNSS, Heel Contact, Toe Off, Insole Pressure Sensor, IMU

1. 緒 言

未来にどれほど発達した交通手段が存在しても、人間にとって最も基本的な移動手段は歩くこと、すなわち「歩行」であろう。歩行は人間の生活の中で最も根本的な移動手段であり、その重要性は言うまでもない。人間の歩行については、平地歩行の研究が数多く行われてきた。しかし、私たちの日常生活では平地だけを歩くことは殆どなく、屋内外には階段が数多く存在し、それらを昇降することは平地を歩くことよりも大きな負担となる。特に、子供や高齢者や身体障害者など、健常者と比較して運動機能が低い人々にとっては、この負担が大きな問題となり得る。彼らにとって、階段は単なる移動経路ではなく、日常生活を送る上での大きな障壁になる場合がある。

人間の歩行性能を評価するための重要な指標として、歩幅、歩行率、および、歩速があげられる。歩幅は、一歩ごとに進む距離を指し、「一歩踏み出した足のつま先からつま先までの長さ」を示している。一方、歩行率は、歩数を時間で割った値を指し、「単位時間あたり歩いた回数」を示している。歩行速度、すなわち歩速は、歩幅と歩行率を掛けた数値で、長い歩幅を持つ人、もしくは、高い歩行率を持つ人は、同じ時間でより遠くまで移動することができる。これらの指標は、個々の人間の歩行能力を評価するだけでなく、年齢や健康状態などの影響も反映する。したがって、これらの指標を理解し、適切に評価することは、健康管理やリハビリテーション、スポーツパフォーマンスの向上などに役立つと考えられる。

歩幅と歩行率の計測には様々な計測装置が利用されている。代表例として、慣性センサ (IMU) 式モーションキャプチャ、光学式モーションキャプチャ、フォースプレート、インソールセンサが挙げられる。これらの装置は、それぞれ長所と短所を持つ。

- 慣性センサ (IMU) 式モーションキャプチャは、加速度や角速度を用いて動きを計測する。特に MEMS IMU は小型で軽量なため、身体の中の部位にでも装着できるが、複数成分 (並進・重力・遠心・接線) の分解や、ドリフト誤差の累積が問題となる。そのため、IMU を歩行計測で利用するには拡張カルマンフィルタなどの高度な情報処理技術が必要となる。
- 光学式モーションキャプチャは、反射マーカや LED マーカの 3 次元位置を高精度に計測する。機械学習を用いたマーカレスタイプや、DLT 法により 3 次元座標を計算するタイプも存在する。複数台のカメラの設置やオクルージョンのために大きな設備が必要となるため、場所を選ぶ。キャリブレーションフレームの撮影によるキャリブレーションが必要となる。
- フォースプレートは、歪みゲージ等によるロードセルを用いて力とモーメントを測定する。プレート直下に設置した複数のロードセルの出力値をもとに計算するため、プレートは剛体で硬くて重く、設置や調整が難しい。圧力中心は求められるが、歩行計測におけるつま先位置の特定は難しい。
- インソールセンサは、主にポリジメチルシロキサン (PDMS) を含む圧電素材をインソール表面に塗布することで足圧分布を計測する。靴の内側に取り付けることができるため、実際の歩行状況、特に接地や離地のタイミングを直接測定することができる。素材が弾性体のため、変形に時間を要する。位置や速度を計測する手段を有しないため、歩幅の計測はできない。

本研究で、我々は、高精度に位置・速度・時刻 (PVT : Position Velocity Time) を計測できる全地球型航法衛星システム (GNSS : Global Navigation Satellite System) を利用した。

- GNSS は、人工衛星から受信機までの距離を計測し、それから緯度・経度・高度・速度・時刻を計算する。位置は世界測地系 (WGS84)、時刻は世界標準時 (GPST) で求められる。よって、位置と時刻のキャリブレーションは不要である。特に、実時間搬送波位相 (RTK : Real Time Kinematic) 方式は精度に優れ、位置ミリメートル、速度センチメートル毎秒、時刻 10 ナノ秒のオーダーで計測することができる。一方、人工衛星からの電波が遮蔽される場所では利用できない、IMU やカメラと比べて最大サンプリング周波数が低い ($\leq 100\text{Hz}$)、10km 圏内に存在する基準局を使用する必要がある、高精度測位解 (FIX 解) が常に保証されない、など多くの短所を持つ。

ところで、階段歩行における歩幅、歩行率を求めるのに必要なセンシング情報は、踵着地 (HC : Heel Contact) 時刻、足趾離地 (TO : Toe Off) 時刻、立脚時の足趾位置である。ここで、HC 時刻は踵の高度・時刻、TO 時刻は足趾の高度・時刻、立脚期は踵または足趾の速度・時刻、足趾の位置は足趾の緯度・経度・時刻から求めることができる。したがって、足趾および踵の 2 点を RTK GNSS で計測すれば、階段歩行における歩幅、歩行率、および、歩速 (=歩幅×歩行率) を高精度で求めることができる、と考えた。

2. 実験方法

2.1 ウェアラブル RTK GNSS

本研究で足趾および踵の測位に使用した GNSS 受信機 (AT-H-35 rev.B) を図 1 に示す。これは、GNSS モジュール Mosaic-X5 (Septentrio 社) を搭載し、内蔵専用処理回路により、サンプリング周波数最大 100Hz の RTK を実行することができる。また、448 チャンネルの衛星信号を同時に補足する上、GPS・GLONASS・BeiDou・Galileo・QZSS (みちびき)・NavIC の 6 衛星システムと、多くの衛星システムでは 3 バンド、QZSS では L1・L2・L5・L6 の 4 バンド (L1C/A, L1C, L2C, L5, L6) に対応する。GNSS アンテナには、3 バンド+L バンド対応のヘリカルアンテナ AS-ANT3B-HEL-L1256-SMA-00 (ArduSimple 社、40mm ϕ × 82.8cm, 35g) を使用した。RTK の測位精度は、水平方向で 0.6cm+0.5ppm、垂直方向で 1cm+1ppm である。

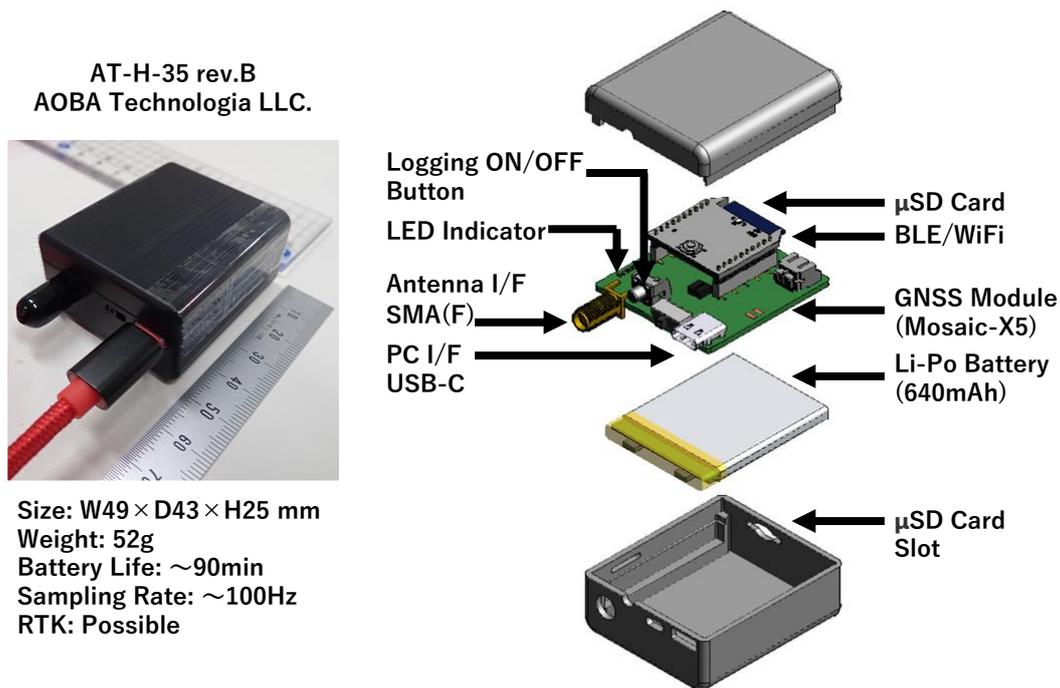


Figure 1. AT-H-35 rev.B, the wearable RTK GNSS Receiver used in this study.

AT-H-35 rev.B は BLE や WiFi で外部と通信し、測位解 (NMEA) のリアルタイムモニタリングや、基準局 (NTRIP Caster・NTRIP Server) から補正情報 (RTCM) を受信する。GNSS の測位解 (NMEA GGA, RMC, VTG) は基板上のマイクロ SD カードに保存されるため、無線通信によるデータの欠落欠損が発生しない。筐体は容積 52.7cm³、重さ 52g で、最大 90 分間 (内蔵 640mAh リチウムイオンポリマー二次電池使用) 連続動作する。

2・2 実験システムの構成

本研究で足趾および踵の測位に使用した実験システムの構成を図 2 に示す。階段歩行する被験者には、前節で述べた GNSS 受信機、インソール足圧センサ、および、IMU の三種類のセンサが装着された。GNSS 受信機は、被験者の右足に履いたスノーシューに 2 台連結金具を用いて固定した。1 台はスノーシューの前方外側、もう 1 台は後方外側に設置し、立脚時の地面が水平の時、それぞれ足趾または踵から外側に 27.5cm、上側に 10cm にア

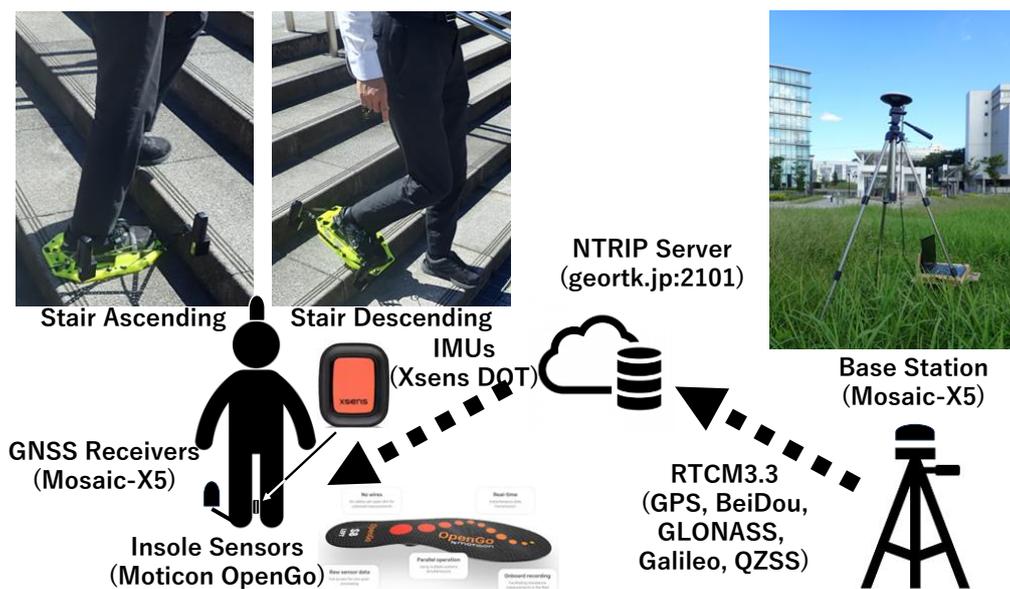


Figure 2. Experimental setup in this study.

アンテナ中心が位置する。RTKに必要な補正情報は、Mosaic-X5 および 3 バンド+L バンド対応の測量アンテナ AS-ANT3B-CAL-L1256-SMATNC-01 (ArduSimple 社) を使用した基準局から RTCM3.3 フォーマット (MCM1005, 1077, 1087, 1097, 1117, 1127, 1230 含む) をインターネット上の NTRIP Server (ジオセンス社, geortk.jp:2101) 経由で受信した。

インソール足圧センサ OpenGo (MOTICON 社) は、離着地タイミングの検証用ゴールドスタンダードとして被験者の左右靴内に設置した。また、被験者の左右踝上部に IMU センサ Xsems DOT (Xsens 社) を設置したが、本稿では実験データの解析が未完了のため詳細は記載しない。尚、インソール足圧センサと IMU センサは共に GNSS のタイムパルスを利用して時刻同期を行っている。

2・3 階段歩行の計測方法

前節で述べた実験システムを青葉山駅前広場 (宮城県仙台市, 緯度 38.2551° 経度 140.835485° 高度 197.7m) に設置した。実験日の天候は晴れ、風は静穏で、人工衛星のヘルス情報に問題はなかった。また、実験日は休日、実験中に通行人はいなかった。被験者は男性 1 名 (健常者, 40 代)。スノーシューを履いて雪面歩行した経験はあるが、転倒の危険性を考慮して、階段は 6 段 (1 段あたりの平均段差 12cm, 平均奥行 38.5cm, メジャーで目測)、手摺がある場所を実験場所に選んだ。被験者は右足にスノーシューを履き、危険時以外は手摺を使わず、手摺を中心に反時計回りで階段を昇降した。

2・4 解析方法

GNSS の測位解 (NMEA) はマイクロ SD カードから解析用 PC にデータをコピーした。インソール足圧センサは OpenGo Software (MOTICON 社) を用いて計測データを解析用 PC に無線転送し、転送データから時刻と左右の足圧 (left total force[N], right total force[N]) を含むテキストファイルを生成した。

NMEA の RMC, GGA, VTG メッセージから時刻、緯度、経度、高度、速度を抽出し、MATLAB (MathWorks 社) の `lla2enu` 関数を用いて測地座標から局地水平座標に変換した。階段歩行中に「測位解の (対地) 速度が 0.05m/s 以下となる時間が 0.1 秒以上続く」範囲の解を「立脚期」にあると判定し、足趾および踵の両方から一步毎に抽出し、それぞれの解の平均値を足趾および踵の立脚期の位置、すなわち「着地位置」とした。また、一步前の「足趾の着地位置」との間の距離を計算することで「歩幅 (ストライド長)」を求めた。

次に、「踵の着地位置」に踵が到着する付近、および、「足趾の着地位置」から足趾が発する付近に、測位解の高度が谷状になる範囲を抽出し、その谷の最下点の時刻をそれぞれ「HC 時刻」および「TO 時刻」とした。また、一步前の「HC 時刻」との間の時間差を求め、その逆数の 2 倍を計算することで「歩行率」を求めた。

最後に、GNSS から求めた「HC 時刻」と「TO 時刻」を、時刻同期したインソール足圧センサの計測データに当て嵌め、ゴールドスタンダードとの比較検証を行った。ここで、インソール足圧センサから得られた足圧 (left total force[N], right total force[N]) は、遊脚時は 0 N になるようキャリブレーションしている。したがって、ゴールドスタンダードでは、足圧が 0 N より大きくなり、その状態が 0.1 秒以上続く時刻を「HC 時刻」、足圧が 0 N 以上から 0 N になった時刻を「TO 時刻」と定義した。

3. 結果と考察

3・1 スノーシューを履いた歩行について

本題に入る前にスノーシューを履いた歩行について述べておく。実験に使用したスノーシュー (PI-1487, Belmont 社) は、靴の下に履き、靴の上からベルトで固定する構造となっている。スノーシューの底面積は靴のそれよりも大きい。長手方向は、靴の端からスノーシューの端まで片側で 3cm, 両側では 2 倍の 6cm のスペース

があり、短手方向では、同じく片側で 5cm、両側で 10cm のスペースがある。スノーシューの底面は、全体的に平坦になっている。材料はプラスチック（ポリエチレン樹脂）で、重量は 650g である。

スノーシュー歩行では、足首の底屈背屈のために足を高く持ち上げ、底が滑りやすい素材のために軟着地した。歩行は慎重にならざるを得ず、スノーシュー歩行は通常歩行とは明らかに動作感覚が異なる。着地位置はスノーシュー歩行でも計測可能だと考えられるが、離着地タイミングは通常歩行と異なる結果になる可能性がある。

3・2 RTK GNSS の測位結果

階段昇降時の RTK GNSS の測位結果を図 3 に示す。左上図が足趾 (toe) の、右上図が踵 (heel) の測位結果となる。測位結果は NMEA で得られるが、それを RTKLIB の rtkplot と Google マップ (Google 社) を用いて可視化している。1 個の丸点が 1 つの測位解を表しており、サンプリング周波数 100Hz で得られた点群は軌跡として認識できる。対地速度が 0.05m/s より大きい測位解は緑色の丸点で、0.05m/s 以下の測位解は青色の丸点で表される。緑色の軌跡上にある幾つかの青色の部分、足趾または踵が静止 (着地) した場所を意味する。

着地位置の測位ばらつきは、階段昇り 1 段目 (Step #1) が水平方向 3.2mm、垂直方向 2.4mm、同 2 段目 (Step #2) が水平方向 4.2mm、垂直方向 6.2mm で、昇降全段の平均は水平方向 4.1mm、垂直方向 5.2mm であった。これらの結果は、Mosaic-X5 のデータシート値 (水平方向 0.6cm+0.5ppm、垂直方向 1cm+1ppm) と同等であり、人体の低位置にある足趾や踵でも GNSS で計測できることを示している。また、同時に頭部で計測した GNSS では、使用衛星数が平均 24.7 機であり、足趾 (25.2 機)・踵 (24.9 機) と同等であった。さらに、実験場所は周囲に 5~8 階建ての建物が存在するにも関わらず、実験期間を通して、頭部・足趾・踵の測位解の FIX 率はいずれも 100% であった。

3・3 歩幅 (ストライド長) の算出

足趾の着地位置の内、連続する二点間の距離を計算することで歩幅が求められる。本研究では、GNSS は右足のみに装着されているため、算出された歩幅はステップ長ではなく、右足のストライド長となる。例えば左足は奇数段、右足は偶数段のように、左右別々の段に着地するのではなく、左右の足がどちらも全段に着地するよう階段昇降しているため、右足のストライド長は階段の一段毎の奥行と高さの影響を受ける。

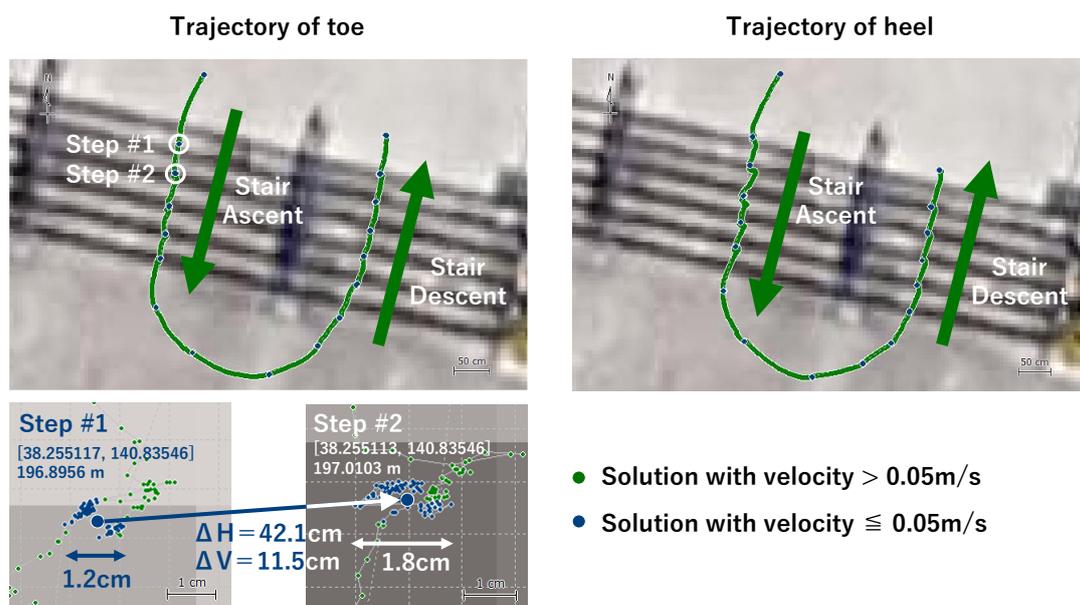


Figure 3 Measurement results of stair ascend and descend using the RTK GNSS.

図3の左下図は、階段昇り1段目 (Step #1) から同2段目 (Step #2) までの階段歩行における歩幅の計算を示している。Step #1 の着地位置は、対地速度が 0.05m/s 以下が 0.1 秒以上連続した測位解の平均座標 [緯度 経度 高度] = [38.25511698° 140.8354604° 196.8956171 m] で、Step #2 のそれは [緯度 経度 高度] = [38.25511322° 140.8354597° 197.0103231 m] である。この二点間の距離を Hybeny の距離公式から計算すると、水平移動距離 $\Delta H=0.420869$ m, 垂直移動距離 $\Delta V=0.114706$ m であることから、歩幅は 0.43622 m と求められる。同様にして、全ての階段歩行の歩幅を計算すると、

昇段 : $\Delta H=0.412647$ m, $\Delta V=0.119111$ m, 歩幅=0.429869 m

降段 : $\Delta H=0.403054$ m, $\Delta V=0.124750$ m, 歩幅=0.422008 m

昇降段 : $\Delta H=0.407851$ m, $\Delta V=0.121930$ m, 歩幅=0.425939 m

と求められる。これらは、階段自体の実測値 (1 段あたりの平均段差 12cm, 平均奥行 38.5cm) と比較して、 ΔV はほぼ一致し、 ΔH は 5.9% 長くなった。これは、歩行が階段に対して蛇行、あるいは、斜行したためである。

3・4 離着地タイミングの算出

Mosaic-X5 は測位解の高度を小数点第 5 桁まで出力できる。Mosaic-X5 の垂直方向の測位精度は 1cm+1ppm であるが、100Hz サンプリングでは測位に使用する衛星の組合せは 0.01 秒前のそれとほぼ一緒であり、連続する離散時間において前後の測位解の高度差を 1×10^{-5} m 単位で表すことができる。階段昇降時の GNSS で計測した右足の足趾および踵の高度 (altitude [m]) と、インソール足圧センサで計測した右足底に掛かる力の合計 (right total force [N]) を図 5 に示す。左上図が昇りで、右上図が下りの計測結果である。GNSS、インソール足圧センサともにセンサの出力データに対してフィルタ処理などの数値加工は一切していない。GNSS から踵の高度 (青線)、足趾の高度 (橙線)、HC 時の踵の高度 (灰点)、および、TO 時の足趾の高度 (赤点) を、インソール足圧センサからは右足底の力の合計 (緑線) を表示している。

GNSS の波形から、高度が 1 秒程度同じ値を保持する期間と山状になる期間が交互に現れている。これはそれぞれ階段歩行の立脚期と遊脚期である。立脚期において、高度が経時的にステップ変化しているが、このステップの高度差が前節で述べた垂直移動距離 ΔV である。一方、インソール足圧センサから、立脚期の中間で小さ

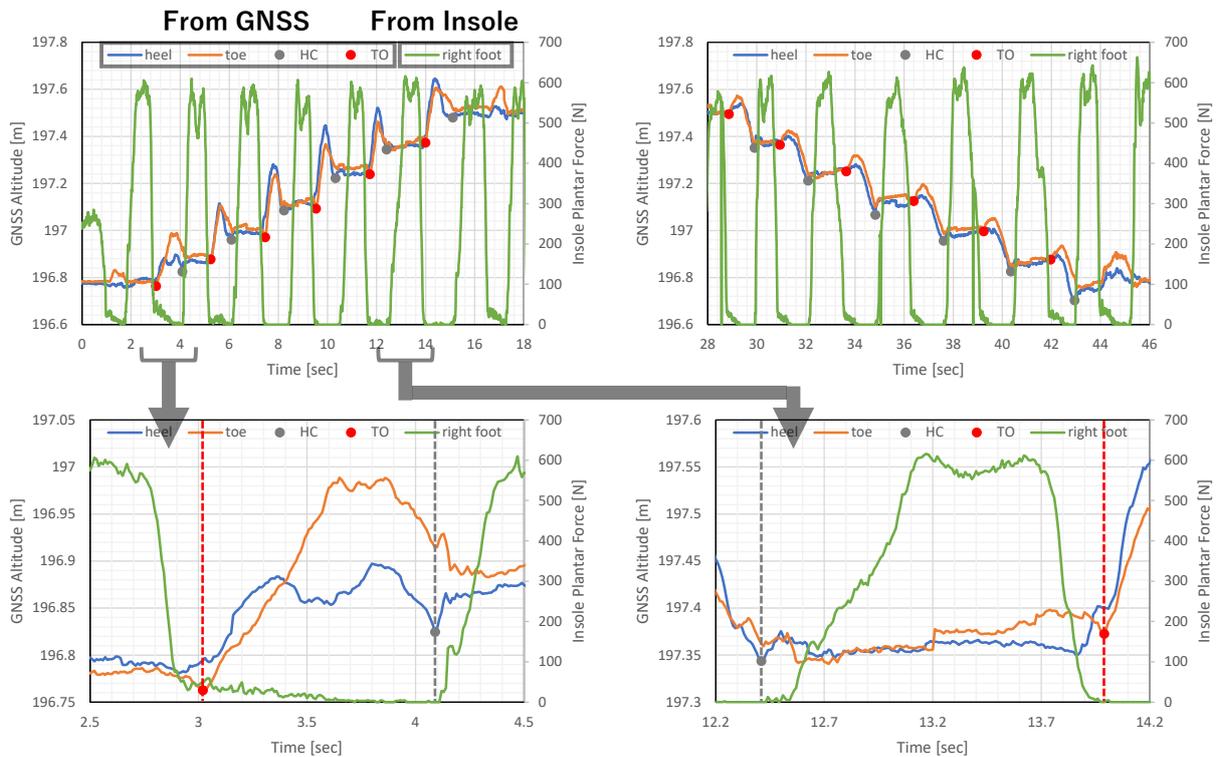


Figure 4 Measurement results of stair ascent and descent using the RTK GNSS and the insole sensor.

い谷を持つ山状の波形と、遊脚期にほぼ 0 N となる平坦な波形が現れている。この立脚期の谷は、着地後の重心の上昇による。TO 直後の遊脚初期にインソール足圧センサの力が 0 N にならない時があるのは、踵もしくは足趾に部分的に力が掛かったため、足関節の底屈背屈の姿勢保持による。

遊脚期と立脚期の時間拡大図を、それぞれ図 4 の左下と右下に示す。TO 時刻は、足趾が着地位置から離れる際に生じる、足趾の高度が谷の最下点となる時刻で、HC 時刻は、踵が着地位置に着く際に生じる、踵の高度が谷の最下点となる時刻である。着地位置への離着の際に、踵と足趾の高度が一時的に下がるのは、スノーシューおよび連結金具が足の踏み込みにより変形したためだと考えられる。右下図で HC からインソール足圧センサの力が上昇するまでに時間差が生じるのは、HC 後にわずかに足圧が発生していることから、軟着地に起因すると考えられる。

GNSS から求めた HC 時刻と TO 時刻の精度検証を行った。ゴールドスタンダードはインソール足圧センサで、その力の合計が 0 [N]かそれ以上かで閾値判定を行った。ただし、先述した足関節の底屈背屈による TO 後の足圧の残存や、軟着陸による HC 後の足圧の上昇の遅れは精度検証から除外した。精度検証の結果、GNSS とインソール足圧センサとのタイミングのずれは、HC が平均 0.0229 秒、TO が平均 0.0225 秒で、どちらも GNSS の方がインソール足圧センサよりも早く検出した。インソール足圧センサは感圧素材（OpenGo のデータシートには不記載、ポリジメチルシロキサン（PDMS）等の圧電体高分子だと推測する）を表面塗布した構造になっている。その感圧素材の高分子の変位時間が検出時間差に反映されたのだと推測される。

3・5 歩行率および歩速の算出

GNSS から算出した階段歩行の歩行率は、昇りが平均 57.7 歩/分、標準偏差 1.5 歩/分で、降りが平均 46.0 歩/分、標準偏差 5.7 歩/分であった。階段昇降全体では、平均 51.2 歩/分、標準偏差 7.2 歩/分であった。歩速は、昇りが平均 0.74 km/h、標準偏差 0.075 km/h で、降りが平均 0.59 km/h、標準偏差 0.094 km/h であった。歩行率、歩速ともに試行回数が昇り 6 回、降り 6 回と少ないため、スノーシューを履いた階段昇降の歩行計測という観点からは、値の確実性が低い。しかしながら、足趾と踵に装着した RTK GNSS で階段歩行の歩幅と歩行率を計測し、歩速を算出できることを立証した。

4. 結 語

本研究では、RTK GNSS を用いて階段歩行の計測を行い、以下の所見を得た。

- (1) スノーシューの足趾および踵の外側側に、その中心から横 27.5cm・縦 10cm 離して装着した GNSS は、階段歩行で 100%の FIX 率を得た。
- (2) NMEA の対地速度 0.05m/s 以下が 0.1 秒以上連続する範囲の測位解を着地位置と定義したところ、その測位誤差は水平 4.3mm、垂直 5.4mm となった。
- (3) 足趾の着地地点の連続する二点間の距離で定義される歩幅（ストライド長）は、(2)の測位誤差の二倍、すなわち水平 8.6mm、垂直 10.8mm の距離精度で算出できる。
- (4) 踵着地地点付近と足趾着地地点付近の RTK GNSS の高度の経時的特徴を利用して踵接地時刻と足趾離地時刻の計測が可能であり、それらの値から遊脚期間、立脚期間、歩行周期、および、歩行率が算出できる。
- (5) スノーシューを履いた階段歩行において、(4)の経時的特徴は、踵着地の最終期、および、足趾着地の最初期に現れる谷の最下点となる。
- (6) (5)の特徴を利用して得られた踵接地時刻と足趾離地時刻は、インソール足圧センサから得られた時刻に対して、それぞれ平均で 0.0229 秒と 0.225 秒差があり、いずれも GNSS で検出した時刻の方が早かった。
- (7) 以上から、RTK GNSS のみを用いて階段歩行の特徴量（歩幅、歩行率、歩速）を高精度で求められることを立証した。

本研究の不利な点は、GNSS を用いた踵と足趾の位置計測にスノーシューを使用したことである。スノーシューを履いた歩行は通常歩行とは異なる動作になるため、踵あるいは足趾の軌跡が通常歩行のそれとは異なることが予想される。しかし、通常歩行はスノーシュー歩行と同様に、立脚・遊脚、着地・離地から構成されるため、着地時の対地速度や離着地時の高度の経時的変化は、通常歩行時でも本研究の手法が概ね利用できる可能性が高い。今後は、通常歩行における RTK GNSS を用いた踵と足趾の位置計測が課題となる。

文 献

- (1) 高浜逸郎, 藤田昌大, “正常人の坂道および階段歩行における動作と下肢関節のモーメント”, 精密機器, Vol. 48, No. 5 (1982), pp. 622-628.
- (2) 江原義弘, 別府政敏, 野村進, 国見ゆみ子, “階段歩行・坂道歩行のエネルギー論的分析”, バイオメカニズム, Vol. 12 (1994), pp. 109-121.
- (3) 鈴木三夫, “歩行分析シリーズ 2. 床反力分析概説”, 医療, Vol. 49, No. 2 (1995), pp. 185-188.
- (4) 枝松千尋, 宮川健, 早田剛, 山口英峰, 小野寺昇, “階段昇降における歩行様式の違いが下肢生体内力に及ぼす影響”, 川崎医療福祉学会誌, Vol. 10, No. 1 (2000), pp. 125-135.
- (5) 森本安夫, “階段歩行についての論理的解析と予備的実験”, 明治鍼灸医学, Vol. 35 (2004), pp. 33-40.
- (6) 仁宮崇, 山田卓郎, 太田茂, “階段昇降における携帯型加速度計の有用性に関する研究”, 川崎医療福祉学会誌, Vol. 15, No. 1 (2005), pp. 161-166.
- (7) 高須知二, 久保信明, 安田明生, “RTK GPS 用プログラムライブラリ RTKLIB の開発・評価および応用”, 日本航法学会 GPS/GNSS Symposium (2007), pp.213-218
- (8) 大西明弘, “歩行速度の違いが階段降段時の体幹前屈運動に与える影響”, 労働安全衛生研究, Vol. 1, No. 3 (2008), pp. 245-249.
- (9) 井川達也, 勝平純司, 山本澄子, “高齢者の歩行・階段昇降動作時における主動作筋および拮抗筋活動についての筋電図学的分析”, 理学療法科学, Vol. 28, No. 1 (2013), pp. 35-38.
- (10) 坂本麻美, 浦部幸夫, 大岡恒雄, 鈴木雄太, 白川泰山, “高齢者の階段昇降に貢献する身体機能は何か”, 理学療法の臨床と研究, Vol. 29 (2020), pp. 77-81.
- (11) 近藤亜希子, “慣性センサを用いた3次元身体運動解析に関する研究”, 博士論文, 秋田大学 (2014)
- (12) Thomas Stöggl, and Alex Martin, “Validation of Moticon’s OpenGo sensor insoles during gait, jumps, balance and cross-country skiing specific imitation movements”, *Journal of Sports Sciences*, Vol. 35, No. 2 (2017), pp. 196-206.
- (13) 櫻井隆, “マーカースモーションキャプチャを用いた歩行動作計測の精度解析”, 修士論文, 電気通信大学 (2022)