

論文の内容の要旨

論文題目 歩行時の靴裏にかかる3軸力分布の計測

氏名 堀 正峻

第1章 序論

本研究の目的は、靴に取りつけて歩いたときの3軸方向の力を計測できる小型かつ軽量の3軸力センサを製作し、その力センサを複数個取り付けた靴と、多チャンネル信号を高速処理できるよう設計した回路と組み合わせ、地面と接触する靴裏にかかるせん断力の分布を計測することである。

人は意図した方向に、意図した速度で運動するために、必要とされる力を地面と接触する面から適切に受け、その力を利用して身体を動かし、自分の思う通りの移動を二足歩行により実現している。このため、歩行運動において地面との接触面が受けるせん断力と垂直抗力を計測することは、歩行の動きとそれに必要な力の関係について理解を深めるために重要となる。

近年、小型の3軸力センサが製作できるようになり始め、普及し始めたことで、靴に力センサをとりつけ、歩く人の足に発生する3軸方向の力の分布を計測できるシステムを構築できる環境が整い始めた。しかしこれまでは、歩行中の荷重に耐え、金属材料を用いない軽量で小型の3軸力センサの製作が難しかった。また歩行運動を阻害しない小型軽量の回路で、靴に複数個取り付けた力センサから送られる数十の信号を、数百Hzのサンプリング周波数で処理することが難しかった。このため、靴に取りつける力センサの数を、被験者が普段の動きを再現できる靴の総重量と、計測に最低限必要なサンプリング周波数を満たすように制限しなければならず、せん断力を含めた力の分布を十分な空間分解能で計測できていなかった。軽量かつ小型であり、被験者の歩行運動を妨げないよう配慮された3軸力センサを製作して計測に用いることと、計測に用いる3軸力センサを高速に処理できる計測用回路を設計製作することで、これらの課題を解決した計測システムを実現する必要がある。

本研究では、市販の靴に用いられる硬さのゴム材料と、微細加工技術MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)を用いて製作した小型センサチップを用いて、被験者が身に着けて歩行運動を行っても違和感なく運動を行えるよう配慮した軽量かつ小型な3軸力セ

ンサを製作する。この力センサは、歩行中にかかる荷重により壊れないよう、靴底としても用いることのできる外枠に固定し、靴に取り付ける。また、電子部品を基板に両面実装して小型軽量化し、またマルチプレクサを用いた高速スイッチングと、時間ロスを抑えたプログラムにより制御される回路を設計製作し、取りつけた3軸力センサから送られる数十の信号を数百Hzのサンプリング周波数で処理できるようにする。この力センサと回路を組み合わせた計測システムを構築することで、歩く時のせん断力の分布が垂直抗力の分布とともに計測できるようにする。また本研究の計測システムでは、既存の計測手法では難しかった水平面を直進するとき以外の歩行計測が簡単に行えるようになる。その例として、傾斜のある面を歩いたときや、円弧を描いて曲がりながら歩くときの3軸力の分布の計測を行い、これまでわからなかった歩行している人が得ている推進方向の力や重心の左右運動のための力が、どの位置でどの程度の大きさで発揮されているのか、分析を行う。

第2章 計測システムの製作

実験に用いる3軸力センサは、MEMS技術で製作したセンサチップ、フレキシブルケーブル、市販されている靴と同程度のShoreA硬度を持つゴム材料で構成した。大きさと重さはそれぞれ、11 mm×11 mm×3.54 mm、と0.6 gであった。この3軸力センサは、市販されている靴と同程度のShoreA硬度であり、なおかつ力センサを構成するゴム材料より柔らかいゴム材料により3Dプリンタで造形した外枠に埋め込む形で固定した。この3軸力センサを固定した外枠は、大きさが25 mm×25 mm×7 mm、合計の重さが15 gであり、歩行時の荷重により3軸力センサが破壊されることを防止し、靴に取り付けたあとは地面と接触する靴底としても機能する。体に身に着けられる小型さと軽量さを実現し、市販の靴を構成している材料と同等のもので構成しているため、身に着けて歩行した際に違和感を感じにくくなるよう配慮できた。3軸力センサが埋め込まれた外枠は、マジックテープにより靴底が取り外し可能な靴に対し、近傍38 mm以内に必ず1つは他の力センサが存在するよう、かかと側に5個、つま先側に11個、合計16個取り付けた。靴に取り付けた3軸力センサの出力を回路で高速処理するため、マルチプレクサによる高速スイッチングで選択した力センサの出力を読み取り、処理時間のロスを抑えるプログラムの工夫を行った。その結果、8個の3軸力センサから得られる電圧出力をサンプリング周波数333 Hzで計測可能な回路を製作できた。回路1つあたりの大きさは縦85 mm、横106 mm、厚さ54 mm、重さは330 gであった。リュックサックなどの入れ物に入れ、持ち運ぶことができる回路が得られた。

第3章 計測システムの評価

歩行時の靴底にかかる力の計測を行う3軸力センサと計測に用いる回路の応答、そして計測システムを装着した時の影響について評価した。

3軸力センサについて、力を加えたときの応答評価を行い、力センサの出力と加えられた

力の関係を示す変換行列を求めた。力は、垂直抗力を 0 N ~ 150 N, 前後方向のせん断力を 0 N ~ 50 N, 左右方向のせん断力を 0 N ~ 35 N まで 3 軸力センサに加えた。その結果, 相関係数 0.99 以上を示す一次近似式が得られ, 力センサの出力を力に変換する行列を求められた。

計測用回路について, ステップ応答, ボード線図, 群遅延, 計測できる入力電圧の範囲の評価を行った。ステップ波形を入力した際は, 20 μ s の遅れを伴い回路の出力に安定した応答が現れることが分かった。このため, 回路の出力する電圧値を差動アンプの参照電圧にそろえる際は, 出力が安定する 50 μ s 後に A/D 変換器の値を読み取ることとした。ボード線図から, 回路に含まれるローパスフィルタのカットオフ周波数が 25 Hz であることが分かった。また, 群遅延評価から, 25 Hz 付近までの波形は 3% の誤差内で同時間の群遅延であることが分かった。歩行計測において現れる 25 Hz 以下の周波数を計測できる回路であると判断できた。最後に, 出力電圧が飽和しない差動アンプの入力電圧の範囲は ± 6.6 mV であることがわかり, この範囲内で 3 軸力センサの出力を力に変換できることが分かった。

計測用回路で得た計測データの時間同期性についての評価では, 最大時間誤差 406 μ s 内で, 各回路は命令を同時に受信していることが分かった。この最大時間誤差は計測時のサンプリングタイムの 13.5% に相当し, この範囲で計測結果は時間的に同期していることが分かった。

計測システムを装着した時の影響を評価は, 被験者の重心に加速度計を取り付け, その上下方向と左右方向の加速度からリサージュ図形を描き, その面積の左右対称性を値が低いほど対称性があることを示す LI 値で評価した。その結果, 計測システムを装着した被験者の LI 値は, 健常者の歩行における LI 値の平均値 23 よりも低い LI 値が確認できた。このため, 計測システムを装着した影響は, 健常者の普段の歩行を再現できる程度に収まっていることが分かった。

第 4 章 歩行時の靴底にかかる力の計測

構築した計測システムを用いて, 歩行時の靴底にかかる 3 軸方向の力分布を計測する実験を行った。

フォースプレートが埋め込まれた専用歩行路を, 計測システムを身に着けた被験者が歩き, 計測システムで得た力の合力のデータと, フォースプレートで計測した合力のデータを比較し, 計測システムを用いた計測で得られる結果の妥当性を評価した。その結果, 構築した計測システムは, 体の左右方向の力において二乗平均平方根誤差 (RMSE) が 15 N, 正規化二乗平均平方根誤差 (NRMSE) が 0.20, 体の前後方向の力において RMSE が 19 N, NRMSE が 0.075, 体の鉛直上向き方向において RMSE が 136 N, NRMSE が 0.24 の精度で, 計測値が地面に与える力と一致していることがわかった。

健常者である被験者 4 人について, トレッドミルで歩行する地面の傾斜角度を変えたとき, 被験者の足にかかる 3 軸力の分布を計測した。左足が接地している間に獲得する力積値を分析したところ, 体の左右方向には傾斜の影響はなかった。体の前後方向では, 地面の傾斜により生まれる重力の地面並行方向の力積値を打ち消すように, 力積値が増減することが

分かった。上下方向では、接地時間の増減に起因する力積値の増減が確認された。左足が接地する間に靴の各位置で獲得する前後方向の力積値に注目すると、主に中指中足骨下周辺と足の内側の土踏まずで、傾斜により生じる重力の分力による力積値の変化に対応していることが確認できた。靴の各位置に働く前後方向の力の平均値、最大値、最小値に注目すると、つま先の小指側周辺は小さな力しか発揮せず、重要性が低いことが確認できた。また上り坂を歩く時、従来減速方向の力しか発揮しないと考えられていたかかとで、推進力が発揮されることが確認された。

健常者である被験者4人について、異なる曲率半径の円の円周上を歩行したとき、足が円の外側、内側にある2つの場合において、靴底にかかる力の分布を計測した。そして歩く円の曲率半径の違いと、直線歩行の時との違いを、足が円の内外側の双方にあるときについて分析した。地面に接地している間に獲得する全力積値は、左右方向についてみると、円歩行の際に現れる遠心力の影響が身体重心の左右移動の動きに現れないよう調整し、足は地面から力積を受けていることが分かった。前後方向についてみると、円歩行を続ける際に絶えず進む方向が円の接線方向と一致するように調整するため、合計値がゼロであった直線歩行の時とは違い、推進方向に力積を受けていることがわかった。上下方向については、直線歩行と差異がみられなかった。地面に一回接地している間に靴底の各位置で獲得する水平方向の力積値に注目すると、つま先の小指の付け根、かかとの中央から前方外の位置において、特に左右方向に力積を発揮していることが確認できた。遠心力に対応するため、円歩行では足の小指側の重要度が高まっていたことが確認できた。

第5章 結論

本研究では、靴に軽量かつ小型な3軸力センサをかかと側に5個、つま先側に11個、合計16個とりつけ、歩行時の靴裏の底にかかる3軸方向の力の分布を空間分解能38 mm以内、サンプリング周波数333 Hzで計測できる計測システムを構築した。この計測システムを用い、傾斜がある地面を歩くととき、円周に沿って歩くととき、靴底にかかる3軸方向の力の分布を計測した。計測から、足全体に働くせん断2方向の力の分布について、接地から離地までに起こる時間的な変化を初めて計測できた。またその結果の分析を行ったところ、歩く地面に傾斜が存在するとき、歩行者がその変化を最も大きく受けるのは足部の第三中足骨下付近であることが確認できた。坂を上るように歩く時は、水平で平坦な床を直進するときには減速方向の力を得る場所と考えられていたかかとで、推進方向に力を発揮する場合があることも示された。円周に沿って歩いたときには、等速円運動と仮定して計測データから算出した遠心力の値から、歩く人は遠心力が一定となるように速度を調整して歩いていることが確認できた。そして、曲率半径が0.5 m未満となると、遠心力を一定に保つことができなくなることが確認できた。足の各位置について計算した力積値からは、円周外側となる足において歩行者が受ける遠心力を緩和するため、直線歩行ではあまり使われなかった第五中足骨下付近が使われることが示された。