

研究テーマ

下肢切断者の3次元義足歩行データベースの構築と活用

研究代表者

施設名 : 国立障害者リハビリテーションセンター研究所
義肢装具技術研究部

氏名 : 中村 隆

研究テーマ：下肢切断者の3次元義足歩行データベースの構築と活用

所属先：国立障害者リハビリテーションセンター研究所

氏名：中村 隆、山内 啓吾

1. はじめに

近年、義足部品は大きく進歩し、多くの下肢切断者が社会参加をはたしている。しかしその一方で、切断原因の多様化に伴う適切なリハビリテーション手法の選択が新たな課題となっている。この課題解決には切断原因の特性を網羅した科学的根拠のあるデータが必要である。一方、最近、ITやAI・機械学習の発展により、ビッグデータ解析のためのデータベースの整備と利活用が様々な分野で注目されている。データベースの構築はそれ自体が研究試料を提供するだけでなく、標準参照値や評価比較指標の設定が可能となり、当該分野の発展に大きく寄与する。人体及び歩行に関しては、すでに国内の研究機関により健常成人の歩行データベースが知られている。義足歩行に関しても、米国のS. Hood[1]らによるデータベース構築が最近報告されたが、対象者の内訳をみると、身長が190cm超であったり、体重が90kg超であったりと日本人の体格とかけ離れており、これらのデータはあくまでも参考値でしかかなり得ない。このような背景から、日本人の義足歩行のデータベースの構築が期待される。

義足歩行計測の手段として、三次元（3D）動作計測はリハビリテーション医学における客観的評価のための手法の一つである。現在、研究分野において最も広く普及しているのは、光学カメラを用いたモーションキャプチャシステムである。この測定システムでは、球状の反射マーカを身体表面の特徴点に貼り付け、複数のカメラでマーカからの反射光の位置情報を取得することで、三次元の関節座標データを取得する。これに対し、最近では加速度センサやジャイロセンサなどの小型センサを体に装着して動作を計測する、マーカレスモーションキャプチャシステムも開発され[2]、健常者の動作解析に関する研究が報告されている。[3]

本研究は下肢切断者の3次元義足歩行データと年齢・合併症等の基本属性を関連づけたデータベースを構築し、義足リハビリテーションおよび義足開発の研究基盤の創生を目的とする。具体的には、下肢切断者の3次元義足歩行データと年齢、切断原因、合併障害、義足使用状況等の属性を含むデータベース構築、解析することで、下肢切断者の義足歩行特性を明らかにすることを目標とする。

2. 方法

○被験者：国立障害者リハビリテーションセンターで義足製作を行った下肢切断者を中心に機縁法により募集した。

○計測方法：義足歩行データの取得は①、②の二つの方法とした。

① 赤外線反射方式の三次元動作計測による屋内平地歩行の3次元データ

計測機器は3次元動作解析装置（Motion Analysis社製 MAC3D）及びフォースプレート（KISTLER社製水晶圧電式多成分フォースプレート9281C/CA）を使用した。

② ウェアラブルセンサーによる屋内平地歩行の3次元データ

計測機器は着衣型のウェアラブルセンサー（e-skin MEVA、Xenoma社）を使用した。各種歩行パラメータの算出に当たっては、e-skin MEVA専用解析ソフトに各種パラメータ算出機能を追加した専用ソフトを作成した。

①と②は同時に計測し、屋内平地歩行データを取得した。計測回数は10試行とし、歩行速度は自由速度（対象者が歩きやすい速度）とした。得られたデータから1歩行周期当たりの各種歩行パラメータを算出し、時間及び距離因子の左右の対称性を算出した。また、モーションキャプチャシステムの精度検証として①と②の膝関節角度の値を比較した。

③ 基本属性および義足使用状況等の情報

対象者からの聞き取り調査または当部が保有する切断者のデータベースから、対象者の性別、年齢、職業、切断原因、切断部位、切断肢数、義足使用歴、断端長、一日当たりの義足使用時間、義足構成部品等のデータを取得した。

全てのデータは、個人を特定可能な情報を排除した後に連結し、データベースを構築した。

○解析方法：まず、対象者の性別、年齢、職業、切断原因、切断部位、義足使用歴等の属性を明らかにし、対象者を切断原因、切断高位の二群に分け、各群の基本的な歩行パラメータ（歩行速度、歩幅、ストライド長、歩隔、遊脚期時間、立脚期時間、両脚支持期時間等）を解析した。

さらに基本的な歩行パラメータに加え、切断者の歩行時安定性の評価指標として下記を算出した。

$$\text{Asymmetry Index}(\%) = \frac{(x_{\text{right}} - x_{\text{left}})}{0.5(x_{\text{right}} + x_{\text{left}})} \times 100 \quad \dots (1)$$

非対称性指数（AI: Asymmetry Index）は、左右の対称性を定量的に評価する指標である。左右の数値の差異を定量化し、左右のバランスや運動の非対称性を測定するために用いられる。算出式（1）では、正の値 x_{right} が右側の優位性、負の値 x_{left} が左側の優位性を示す。単位はパーセンテージで表され、非対称性指数の値が大きくなるほど左右の非対称性が強いことを意味する。[4]

$$\text{Root Mean Square} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad \dots (2)$$

二乗平均平方根（RMS: Root Mean Square）は、動作解析において、主に信号や運動データの変動を定量的に評価するために用いられる。具体的には、特定のデータセットの各点を二乗し、その平均値を取得、平方根を計算することで得られる。動作解析では、RMSはしばしば加速度、速度、位置データを解析する際に用いられる。位置データの変動をRMSによって定量的に表すことで左右の動作の対称性や、特定の動作

パターンにおける安定性、変動を分析することが出来る。[5]

今回の分析では個々の切断者の特性が異なり、その多様性から等分散性、正規性が保証されないことが予め予測された。したがって、統計的分析においては、分散の比較にノンパラメトリックなLevene検定、中央値の比較にはマンホイットニーU検定、平均値にはt検定による二群間の検定を行った。t検定については、等分散性を検定しパラメータごとの分布特性に応じてStudentのt検定とWelchのt検定を選択する。また、算出可能なものについてはブートストラップ法によって95%信頼区間を確認し、数値の妥当性を検討した。対応のある比較分析（群内比較）には、平均値にt検定、中央値にウィルコクソンの順位符号和検定、分散にLevene検定を使用した。なお、統計検定は「2群間で値が有意に異なる」ことを帰無仮説とし、有意水準を5%未満（ $\alpha=0.05$ ）とした。

3. 結果

対象者：40名の義足歩行データを取得した。対象者の基本属性を表1に示す。

表1 対象者の基本属性

人数	40
性別	男性 39名 女性 1名
平均年齢	52.7 (±13.6) 才
切断時の平均年齢	31.0 (±16.3) 才
義足使用歴	21.2 (±17.8) 年
切断原因	外傷 29名 (交通事故 22名) 疾病 10名 先天性 1名
切断肢数と切断高位	一肢切断 36名 (下腿切断 14名、膝関節離断 1名、 大腿切断 19名、股関節離断 2名) 二肢切断 3名 (両側下腿切断 2名、両側大腿切断 1名) 三肢切断 1名 (下腿大腿切断 1名)
1日の平均義足装着時間	13.8 (±3.3) 年
1日の平均義足歩行時間	3.1 (±2.8) 年

このうち、交通外傷による切断者の属性を表2に示す。交通外傷による対象者には両側切断4名が含まれ、さらに片側下肢切断者の半数が対側下肢や他の部位の骨折等を事故時に受傷していたことが分かった。

表2 交通外傷による対象者の基本属性

人数	22
性別	男性 22名 女性 0名
平均年齢	51.2 (±13.8) 才
切断時の平均年齢	29.8 (±14.0) 才

義足使用歴	21.5 (±18.1) 年
切断肢数と切断高位	一肢切断 18名 (下腿切断 5名、膝関節離断 1名、 大腿切断 12名) 二肢切断 3名 (両側下腿切断 2名、両側大腿切断1名) 三肢切断 1名 (下腿大腿切断 1名)
1日の義足装着時間	13.7 (±3.5) 年
1日の義足歩行時間	4.2 (±3.5) 年
受傷時の障害	両側切断 4名、対側下肢の骨折 4名、骨盤骨折 2名、 上肢の骨折・切断 2名、肋骨骨折 1名

以降、解析の終了したデータについて計測機器ごとに結果を述べる。

- ①赤外線反射方式の三次元動作計測による屋内平地歩行の3次元データ
片側下肢切断者31名を対象とした。対象者の基本属性を表3に示す。

表3 対象者の基本属性

人数	31 名
性別	男性 31名 女性 0名
平均年齢	54.6±10.7 才
切断原因	外傷 23名 (交通事故 17名) 疾病 8名
切断高位	下腿切断 11名 大腿切断 18名 股関節離断 2名
切断側	右 15名 左 16名
切断からの平均期間	21.6±17.1 年
1日の平均義足装着時間	13.9±2.4 時間
1日の平均義足歩行時間	3.5±3.2 時間

交通外傷群とそれ以外の切断原因を持つ2群に分け、交通外傷群特有の歩行特性を群間の統計比較によって探索した。得られた結果を表4に示す。

表4 2群間の歩行パラメータ比較 (○: 有意水準 $\alpha=0.05$)

		交通外傷群	その他の原因群	有意差
歩行速度(mm/sec)	平均値	1245.60 (±181.21)	1144.27 (±220.65)	ns
	中央値	1267.62	1148.11	ns
	分散	32836.20	48686.09	ns
ケ ー デ ン ス (steps/min)	平均値	111.93 (±6.93)	105.71 (±10.09)	ns
	中央値	111.66	107.90	ns

	分散	48.03	101.73	ns
切断側ストライド (mm)	平均値	1337.89 (±176.48)	1300.26 (±229.48)	ns
	中央値	1321.01	1375.68	ns
	分散	31144.64	52661.65	ns
非切断側ストライド (mm)	平均値	1339.63 (±175.99)	1300.54 (±231.80)	ns
	中央値	1346.84	1377.87	ns
	分散	30972.24	53731.50	ns
切断側立脚期 (秒)	平均値	0.68 (±0.080)	0.71 (±0.076)	ns
	中央値	0.67	0.68	ns
	分散	0.0064	0.0057	ns
非切断側立脚期 (秒)	平均値	0.71 (±0.076)	0.78 (±0.12)	ns
	中央値	0.70	0.73	ns
	分散	0.0057	0.013	ns
切断側遊脚期 (秒)	平均値	0.40 (±0.080)	0.45 (±0.059)	ns
	中央値	0.42	0.44	ns
	分散	0.0065	0.0034	ns
非切断側遊脚期 (秒)	平均値	0.37 (±0.057)	0.40 (±0.066)	ns
	中央値	0.37	0.40	ns
	分散	0.0032	0.0044	ns
非対称性指数				
ストライド左右非 対称性 (%)	平均値	-0.13 (±0.89)	0.063 (±1.56)	ns
	中央値	-0.089	-0.22	ns
	分散	0.79	2.44	ns
立脚期時間左右非 対称性 (%)	平均値	-4.24 (±9.16)	-8.12 (±8.44)	ns
	中央値	-8.17	-8.17	ns
	分散	83.83	71.19	ns
遊脚期時間左右非 対称性 (%)	平均値	5.30 (±21.11)	12.70 (±18.68)	ns
	中央値	11.78	14.51	ns
	分散	445.51	349.13	ns
二乗平均平方根				
上体RMS値	平均値	44.22 (±7.74)	52.41 (±10.97)	○
	中央値	43.33	51.11	○

	分散	59.86	120.29	ns
切断側膝左右方向 RMS値	平均値	154.49 (±41.79)	166.45 (±25.85)	ns
	中央値	168.10	165.19	ns
	分散	1746.56	668.28	ns
非切断側膝左右方 向RMS値	平均値	166.13 (±47.41)	168.60 (±23.11)	ns
	中央値	166.18	166.02	ns
	分散	2248.07	534.15	ns

これらのうち、2群間で上体の左右方向RMS値の平均値と中央値のみ統計的有意に差があった。また、分散に統計的有意な差は認められなかった。

次に、交通外傷群特有の歩行特性を探索するために2群それぞれでパラメータ間の相関行列を算出した。相関係数を行列にまとめたものを図2に示す。

図2.1 その他群のパラメータ間相関行列

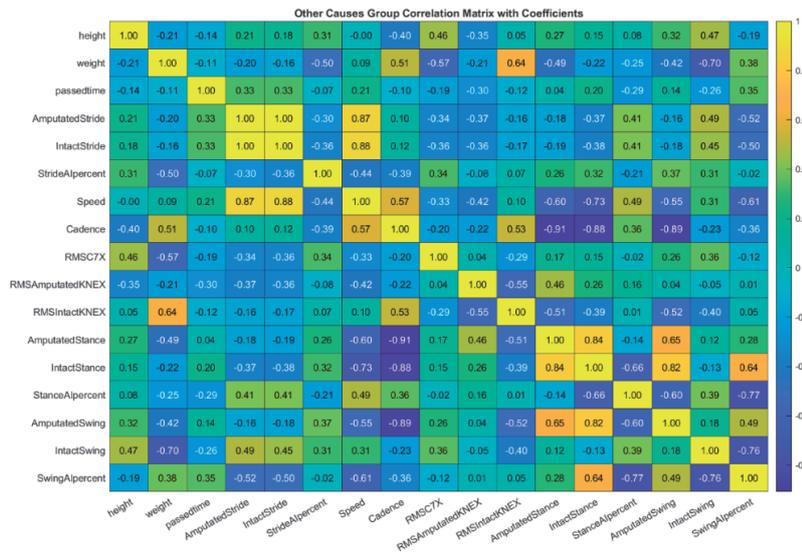
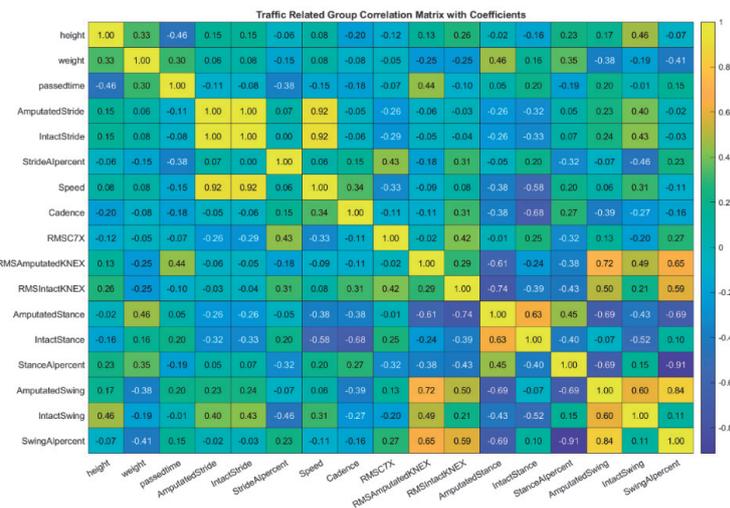


図2.2 交通外傷群のパラメータ間相関行列



2群の相関行列を比較し、交通外傷群特有の歩行特性を分析する。具体的には、下記の2点を基準として2群間で評価を行い交通外傷群がその他群と異なる点を統計的に比較する。

- 少なくとも一方が相関係数 $r > |0.6|$ （中～強程度の相関）であるパラメータ
- 2群間の相関係数でFisherのz変換(3)を用いて検定し、統計的に有意に差が認められたもの

$$z_1 = \frac{1}{2} \log \left(\frac{1+r_1}{1-r_1} \right), \quad z_2 = \frac{1}{2} \log \left(\frac{1+r_2}{1-r_2} \right)$$

$$z_{diff} = z_1 - z_2$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n_1-3} + \frac{1}{n_2-3}}$$

$$z = \frac{z_1 - z_2}{SE} \dots (3)$$

分析の結果、条件に当てはまったものを表5に示す。

表5 2群間の相関分析比較の結果

組み合わせ	交通外傷群の 相関係数	その他群の 相関係数	Z統計量	信頼区間 下限値	信頼区間 上限値	有意差
体重 (kg) vs 非切断側膝左 右方向RMS	-0.247	0.638	-3.7	-1.54	-0.47	○
体重 (kg) vs 非切断側 遊脚期時間	-0.185	-0.703	2.52	0.15	1.22	○
歩行速度 (mm/sec) vs 遊脚期左右非 対称性 (%)	-0.106	-0.608	2.20	0.07	1.13	○

(有意水準 $\alpha = 0.05$)

②ウェアラブルモーションキャプチャシステムを用いた屋内平地歩行の3次元データ解析を完了した下肢切断者26名の基本属性を表6に示す。

表6 対象者の基本属性

人数	26	
性別	男性 25名	女性 1名
切断原因	外傷 18名	疾病 8名
切断高位	下腿切断	11名
	膝関節離断	2名
	大腿切断	11名
	股関節離断	2名
切断肢数	一肢切断	22名
	二肢切断	3名
	三肢切断	1名

このうち片側切断者の解析結果を表7に示す。算出された各種パラメータをみると、下腿切断者の歩行速度は大腿切断者よりも早く、健側立脚相の割合が切断側よりも小さいなど、義足歩行の特性を表していた。

表7 対象者の基本属性

		すべて	大腿切断	下腿切断
歩行速度 (km/h)		4.35 (±0.58)	4.17 (±0.50)	4.61 (±0.64)
時間的要因		すべて	大腿切断	下腿切断
立脚相割合 (%)	切断側	60.27 (±2.82)	60.33 (±3.10)	60.18 (±2.62)
	健側	61.03 (±3.97)	61.86 (±4.32)	59.78 (±3.35)
遊脚相割合 (%)	切断側	39.73 (±11.71)	39.67 (±13.03)	39.82 (±10.6)
	健側	38.97 (±3.97)	38.14 (±4.32)	40.22 (±3.35)
両脚支持期割合 (%)	切断側	10.66 (±2.78)	10.47 (±2.46)	10.95 (±3.42)
	健側	10.43 (±3.45)	11.37 (±3.51)	9.02 (±3.10)
距離的要因		全体	TF	TT
ストライド長 (cm)	切断側	131.30 (±15.83)	129.65 (±13.08)	133.78 (±20.38)
	健側	131.99 (±15.83)	130.05 (±13.96)	134.90 (±19.31)
歩幅 (cm)	切断側	65.72 (±9.19)	64.90 (±9.33)	66.96 (±9.69)
	健側	66.87 (±9.69)	65.69 (±8.27)	68.64 (±12.13)
歩隔 (cm)	切断側	18.95 (±6.01)	20.21 (±6.40)	17.07 (±5.34)
	健側	18.84 (±5.82)	20.05 (±6.31)	17.02 (±4.95)

さらに、膝関節角度変化の例を図3に示す。e-skin Mevaによる膝関節角度変化の様子は光学式3次元計測Mac3Dの計測結果とほぼ一致した。ただし、最大関節屈曲角度はe-skin Mevaの方が5%ほど大きかった。

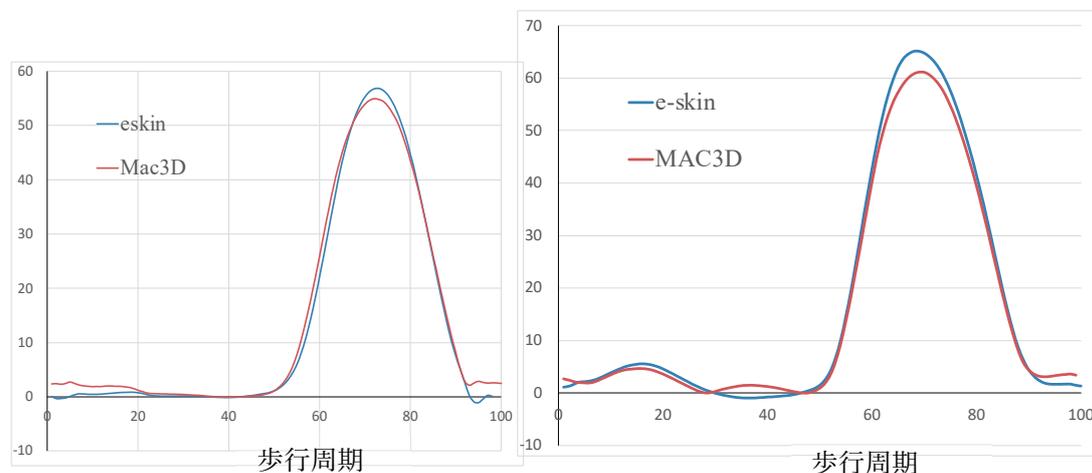


図3 膝関節角度変化 左：3R92（オットボック） 右：Genium（オットボック）

e-skin Mevaによる歩行計測は、スーツ装着からデータ解析まで15分以内で完了し（同時計測における光学モーションシステムのマーカー装着時間を除く）、臨床的にも実施可能である簡便さであった。

4. 考察

①光学式3次元動作解析のデータ解析では、基本的な歩行パラメータについて統計的に有意な差は認められなかった。一方で、交通外傷群では体重と非切断側膝の左右

方向RMS値に弱い負の相関が見られたが、その他群で強い負の相関が見られた。このことから、交通外傷群では、体重の増加と膝の左右方向安定性が関連していない可能性が示唆された。これは、交通外傷群が非切断側にも後遺症や障害などの不安定性を抱えている場合が多く、非切断側膝の運動制御に影響を及ぼしている可能性があると考えられる。また、体重と非切断側の遊脚期の相関比較の結果から、交通外傷による歩行パターンの変化の可能性が示唆された。その他群では、体重の増加に伴い遊脚期が短くなる傾向が相関係数によって確認されたが、交通外傷群では非切断側の遊脚期に異なる要因が影響を与えている可能性がある。さらに歩行速度と左右非対称性の関連性である。その他群では歩行速度の増加に伴い左右対称性が低下する（左右差が大きくなる）傾向が強いことが確認された。これは、速度が増加するにつれて非切断側と切断側の違いが顕著になり、左右非対称性が増すからだと考えられる。一方で交通外傷群では、歩行速度と左右の非対称性の関連性が見られず、異なった歩行パターンを持つ可能性が考えられる。

これらの結果から、交通外傷群は非切断側の運動制御や安定性に影響を及ぼす要因が他の群よりも複雑であり、単純な体重増加や歩行速度に基づく影響だけでは説明できないことが示唆された。交通外傷特有の非切断側の後遺症や障害、歩行パターンの変化がこうした相関の違いを生み出している可能性が高い。

②モーションキャプチャシステムe-skin Mevaはこれまで健常者の歩行分析の報告はあるものの、義足歩行解析に用いた報告はない。本研究で得られた結果は健常者だけでなく義足歩行解析にも応用可能な可能性を示していた。計測精度検証の必要性はあるものの、光学式3次元動作計測よりも被験者負担が少なく、早く簡便に計測可能であることから、今後の展開が期待される。

本研究では当初60名の下肢切断者の義足歩行データの獲得を目標としたが、研究期間の前半がコロナ禍に重なったことも有り、十分な被験者を集めることができなかった。しかし、それでもなお、40名の同一条件による義足歩行データは本邦では類を見ない。また、対象者の多くが、国立障害者リハビリテーションセンターで義足製作と歩行訓練を行った下肢切断者である。義足歩行はリハビリテーション訓練のプロトコルにも大きく影響すると考えられ、今後は多施設で歩行訓練を受けた下肢切断者の歩行データの蓄積が求められる。

5. まとめ

下肢切断者の義足歩行データベースの構築と活用を目的として、2種の計測装置を用いて計測を行い、データを蓄積した。また、その解析結果から、下肢切断者の属性による義足歩行特性の把握を試みた。

本研究で構築したデータベースは国立障害者リハビリテーションセンターのデータポリシーに従って、外部公開を予定しており、本研究データを活用した義足歩行に関する研究が促進されることが期待される。

引用文献

- 1) HOOD, Sarah, et al. A kinematic and kinetic dataset of 18 above-knee amputees walking at various speeds. *Scientific Data*, 2020, 7.1: 1-8.
- 2) 春名 弘一, 昆 恵介, 稲垣 潤, 佐藤 洋一郎, マーカーレスモーションキャプチャによる三次元動作解析の応用例, 義装会誌, 2019, 35(1), p.17-23.
- 3) 佐久間亨; 木村健作; 小林真. 慣性センサ式モーションキャプチャで収集した 3 次元関節キネマティクスデータに基づく正常歩行の標準値. *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2024, 23026.
- 4) Auvinet et al. New Lower-Limb Gait asymmetry Indices Based on a Depth Camera, *Sensors*, 2015, 15(3), 4605-4623.
- 5) Del Din, S., & Moore, S. A., Gait asymmetry post-stroke: Determining valid and reliable methods using a single accelerometer located on the trunk. *Sensors*, 2020, 20(1), 37.

学術発表

- 1) Keigo Yamauchi, Takashi Nakamura, Koji Nakamura, Hiroki Imai, Gai Higuchi, Ryoza Tanaka. Construction and Utilization of a Three-Dimensional Prosthetic Gait Database for Lower Limb Amputees. 第30回日本義肢装具学会講演集, 2024, p.158.
- 2) Takashi Nakamura, Keigo Yamauchi, Gai Higuchi, Koji Nakamura, Hiroki Imai, Atsuko Mitsumoto, Ayako Yano, Mayuko Tanaka, Ryoza Tanaka and Yusuke Okuma, PROSTHETIC GAIT ANALYSIS USING A WEARABLE MOTION CAPTURE SYSTEM. 8th Asian Prosthetic& Orthotic Scientific Meeting. Programbook 63, 21st-23rd August 2024, Kuala Lumpur, Malaysia.
- 3) Keigo Yamauchi, Takashi Nakamura. Exploring Reference Gait Parameters for Lower Limb Amputees Through Clinical Data. 8th Asian Prosthetic& Orthotic Scientific Meeting. Programbook 63, 21st-23rd August 2024, Kuala Lumpur, Malaysia.