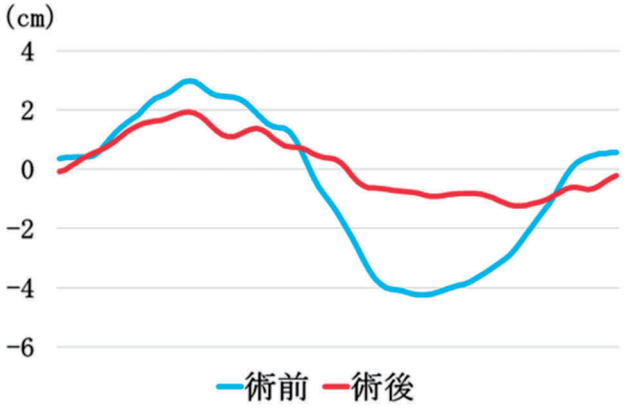
52　人工股関節術後の歩行能力を予測するアルゴリズム構築	加畑　多文

【目的】人工股関節全置換術（THA）は変形性股関節症の手術として広く普及しており、除痛に優れ、歩行能力、日常生活動作能力、生活の質の改善に有効である。古くからTHAの術後合併症として脱臼が問題視されてきたが、近年は至適なインプラント設置条件が確立され、THA 術後の長期成績は大幅に改善してきている。一方で、日本では超高齢社会を迎え、健康寿命の延伸や要介護リスクの低減が望まれる中で、ロコモティブシンドローム（ロコモ）という概念が提唱された。THA では他の下肢の手術よりもロコモが改善する症例が多いものの、49%の症例には変化がみられず、身体機能の改善の余地があることが示された。この結果から、これまで追及されてきた合併症リスクを低減させるという視点に加えて、手術後の歩行能力を最大化させるという視点で患者一人一人に合わせたインプラント設置を検討する必要があると考えた。本報告では、その第一段階として、手術後の歩行能力を予測する学習モデルを作成することを試みた。現在、データの収集中であるため、途中経過を報告する。

【方法】2022 年 7 月から 2023 年 1 月の間に、当院で初回片側 THA を施行した 29 例 29 股を対象とした。マーカーレス動作解析装置「鑑（AKIRA）」を用いて、手術前と手術後（退院時）の通常歩行を 3 次元的に計測した。計測データから、①歩行の左右対称性、②歩行安定性、③歩行推進力を算出した。左右対称性は、各歩行周期中の身体重心の手術側への最大偏位量を非手術側への最大偏位量で除して、100 分率で表した値とした。歩行安定性は、重複歩距離の変動係数で表した。歩行推進力は、歩行中の股関節最大伸展角度で表した。手術前と手術後の歩行パラメータの比較には、対応のあるｔ検定を用い、危険率は5%とした。さらに、手術後の歩行パラメータを予測する機械学習モデルを作成した。目的変数は、①～③の歩行パラメータ、説明変数は患者基本情報や手術前の形態学的パラメータ、手術中のパラメータとした。データを、訓練データセットとテストデータセットに 1：1 の割合で分割した。eXtreme Gradient Boosting アルゴリズム（XGBoost）を用いて、訓練データを学習させた。精度評価には、決定係数を用いた。

【結果】対象の平均年齢は 65.7 歳、男性 2 例で女性 27 例、手術側は左下肢が 17 例、右下肢が 12 例であった。脚長差は、手術前は 8.92 mm、手術後は 0.34 mm と手術前後ともに手術側で長く、手術後に有意に改善した。3 次元大腿骨 オフセットは、手術前は 38.3 mm、手術後は 43.3 mm と、手術後に有意に大きくなった。歩行の左右対称性は、手術前は 183.2%、手術後は 147.8%で有意な変化は認めなかった。しかし、症例を見ると、歩行中の過度な重心偏位が明らかに改善する症例も存在した（図）。歩行安定性は、手術前は3.2%、手術後は2.3%と有意な改善を認めた。歩行推進力は、手術前は19.1 度、手術後は22.1 度と有意な変化は認めなかった。各歩行パラメータを予測するモデルの決定係数は、歩行左右対称性では0.05、歩行安定性では0.01、歩行推進力では0.05 と低い予測性能であった。

手術前後の歩行中の重心偏位の 1 例



52. 人工股関節術後の歩行能力を予測するアルゴリズム構築

加畑　多文

金沢大学 医薬保健研究域医学系 整形外科学教室

Key words：変形性股関節症，人工股関節全置換術，歩行，マーカーレス動作解析，人工知能

緒　言

人工股関節全置換術（THA）は変形性股関節症の手術として広く普及しており、除痛に優れ、歩行能力、日常生活動作（ADL）能力の改善に有効である。古くから THA の合併症として脱臼が問題視されており、そのリスクの低減を目的に、多数の研究者が理想的なインプラント設置位置や角度を追及してきた［1］。近年は、合併症予防という視点での至適なインプラント設置条件が確立され、手術技術や機器が発展し、THA 後の長期成績は大幅に改善してきている。一方で、日本では超高齢社会を迎え、健康寿命の延伸や要介護リスクの低減が望まれる中で、ロコモティブシンドローム（ロコモ）という概念が提唱された。ロコモは、運動器疾患によって、ADL 制限またはそのリスクが高くなる状況を指す。我々は、THA では他の手術よりもロコモ度が改善しやすい一方で、49%の症例には変化がみられず、身体機能の改善の余地があることを示した［2］。この結果から、これまでの合併症リスクを低減させるという視点に加えて、手術後の歩行能力を最大化させるという視点で患者個々に合わせたインプラント設置を検討する必要があると考えた。

本研究では、手術後の歩行能力を予測する学習モデルを作成し、それを基に患者個々に合わせた理想的なインプラント設置を決定するアルゴリズムを構築することを最終的な目的とした。第一段階として、手術前後の歩行能力の変化を検討し、手術後の歩行能力を予測する学習モデルを作成することを試みた。現在、データの蓄積段階であるため、途中経過を報告する。

方　法

1. 研究デザインと対象

本研究は、倫理審査委員会に承認された前向き研究である。2022 年 7 月から 2023 年 1 月に、初回片側 THA を施行した 35 例 35 股を対象とした。除外基準は、①手術前後の歩行データの欠損例、②神経系疾患に起因する歩行障害を呈する症例とした。最終的に 29 例 29 股を解析対象とした。

2. 歩行計測と解析

マーカーレス動作解析装置「鑑」を用いて、手術前と退院時の通常歩行を 3 次元的に計測した。歩行者の 25 の関節や部位に割付された仮想マーカーの 3 次元座標（図 1）や歩行パラメータを出力した。出力データから、①歩行の左右対称性、②歩行安定性、③歩行推進力を算出した。左右対称性では、各歩行周期中の身体重心の手術側への最大偏位量と非手術側への最大偏位量を算出し、それぞれの平均値を求めた。さらに、手術側への偏位量を、非手術側への偏位量で除して、100 分率で表した。この値が大きい程、非手術側に対して手術側の偏位量が大きく、非対称であることを示す。歩行安定性は、重複歩距離の変動係数で表した。変動係数は、重複歩距離の標準偏差を平均値で除して、100 分率とした［3］。歩行推進力は、歩行中の股関節最大伸展角度とした。最大伸展角度は、鉛直線と手術側下肢の仮想マーカー“Hip”と“Knee”を結ぶ直線を矢状面に投影し、その内角の最大角度とした。歩行パラメータを予測する説明変数として、患者基本情報と手術前の形態学的パラメータ、手術中のパラメータを抽出した。

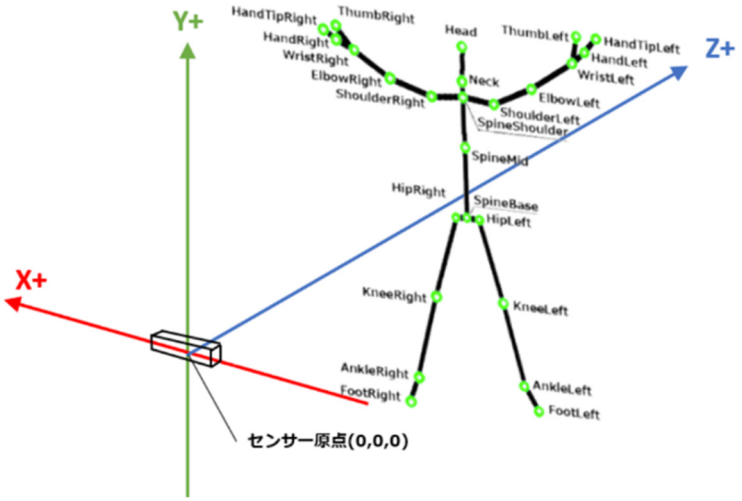


図 1. 鑑の仮想マーカー

25 の身体部位に座標点を設定している。

3. 統計解析と機械学習

手術前後の歩行パラメータの比較には、対応のある t 検定を用いた。危険率は 5%とした。次に機械学習を用いて、手術後の歩行パラメータを予測した。目的変数は、歩行の左右対称性、歩行安定性、歩行推進力とした。説明変数は、患者基本情報と手術前の形態学的パラメータ、手術中のパラメータとした。現段階では、症例数が少ないため、データを訓練データとテストデータに 1：1 の割合で分割した。eXtreme Gradient Boosting（XGBoost）アルゴリズムを用いて、訓練データを学習させた。精度評価には、決定係数を用い、～0.1 を予測精度が非常に低い、0.1～0.3 を低い、0.3～0.6 を標準、0.6～0.9 を高い、0.9～1.0 を非常に高いとした。

結　果

1. 患者基本情報と手術前の身体機能

対象は、平均年齢が 65.7 歳、男性 2 例で女性 27 例であった。脚長差は 8.92 mm と手術側で長く、3 次元大腿骨オフセットは 38.3 mm であった。

2. 手術中のパラメータ

カップの外方開角は 37.9 度、前方開角は 20.1 度であり、ステムの前捻角は 28.1 度であった。脚長差は 0.34 mm と手術側で長く、手術前と比べて有意に改善した（$p<0.001$）。3 次元大腿骨オフセットは 43.3 mm であり、手術前と比べて有意に増加した（$p<0.001$）。

3. 歩行パラメータ

手術前と手術後の歩行左右対称性と歩行安定性、歩行推進力を比較した（表 1）。左右対称性は、手術前は 183.2%、手術後は 147.8%で有意な変化は認めなかった。しかし、症例を見ると、過度な重心偏位が改善する症例も存在した（図 2）。歩行安定性は、手術前は 3.2%、手術後は 2.3%と有意な改善を認めた。歩行推進力は、手術前は 19.1 度、手術後は 22.1 度と有意な変化は認めなかった。実際の歩行パラメータと、機械学習モデルにより予測された値の分布を図 3 に示した。各歩行パラメータの予測モデルの決定係数は、歩行左右対称性では 0.05、歩行安定性では 0.01、歩行推進力では 0.05 であった。

表 1. 手術前後の歩行パラメータの変化

	手術前	手術後	p値
歩行左右対称性(%)	183.2 (227.1)	147.8 (114.5)	0.436
歩行安定性(%)	3.2 (1.5)	2.3 (1.3)	<0.001
歩行推進力(度)	19.1 (6.6)	22.1 (7.2)	0.132

対応のあるｔ検定を使用。

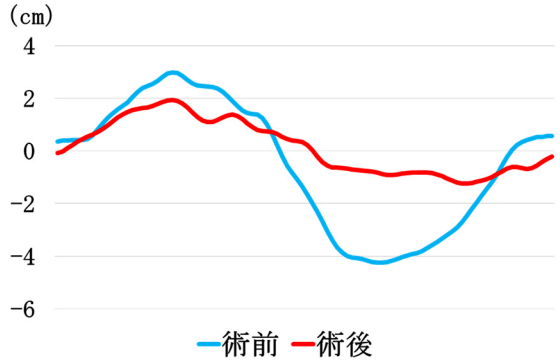


図 2. 手術前後の歩行中の重心偏位の 1 例
横軸は手術側の踵接地から次の踵接地までの重心偏位を示す。縦軸の正の値は手術側、負の値は非術側への重心偏位の大きさを表す。

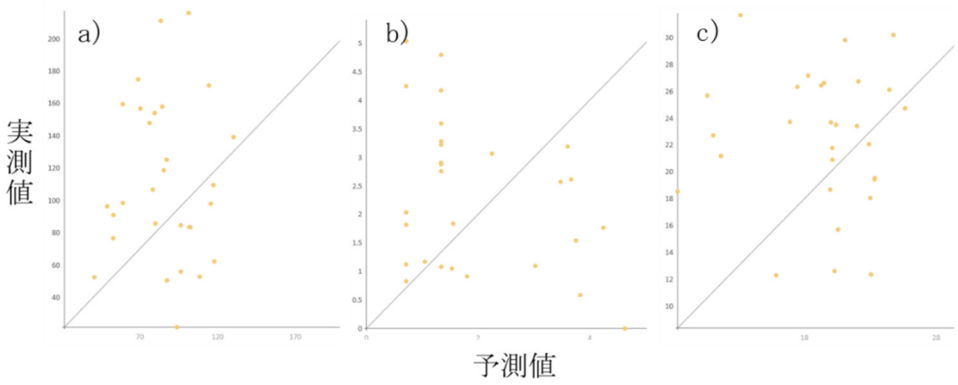


図 3. 機械学習モデルの予測値と実測値の関係
a) 左右対称性。
b) 安定性。
c) 推進力。

考　察

現在、データの蓄積段階であるため、本報告では少数ではあるが、THA 前後の歩行パラメータの変化を解析し、退院時のパラメータを予測する学習モデルを作成した。その結果、THA 後 2 週の退院時では、左右対称性は有意な改善を認めなかった。THA 後 1 年では、脚長差が 1 cm 以下であれば、歩行中の動揺への影響は小さいとされている［4］。本研究では、手術により脚長差が是正されたものの、術後早期であるため筋力低下や残存脚長を補正する機能の不足が、非対称性に影響していると考える。今後、手術後半年と 1 年の筋力計測で、関連性を明らかにする。さら

に、図 2 のように退院時に正常歩行の重心偏位量である 2 cm 以内までに改善する症例もあるため、左右対称性の改善に関連する因子の検討を行う必要がある。また本研究では、歩行の安定性に有意な改善を認めた。重複歩距離の変動値は、 70 歳前後の健常高齢者で 2.1%であることから、退院の段階で健常高齢者に近い安定性を得ることができたと言える［5］。重複歩距離の変動値は単脚支持時間の変動性の影響を受けるため、変動値の改善には除痛による単脚支持機能の改善が寄与したと考える［6］。さらに、歩行推進力は、退院時に 70%の症例に改善を認めたものの、データ全体では有意な改善は認めなかった。既報では、THA 後 6 週で歩行中の股関節伸展角度は、手術前よりも改善すると報告されている［7］。今後の経過の中で改善すると考える。一方で、退院時の歩行能力を予測する機械学習モデルの予測性能は低かった。機械学習は、学習データの傾向を基に予測結果を出力するため、十分な学習データ数を必要とする。今後は、200 例を目標にデータを蓄積して、今回の左右対称性や推進力の結果で明らかとなった患者の個別性に関連する因子を検討する。その後は、手術後 1 年の歩行パラメータを予測する学習モデルを作製し、歩行パラメータを最適化するための理想的なインプラント設置条件を推定するアルゴリズムを構築する。今回の検討は、この手順の土台を形成する重要なステップであったと考える。

共同研究者・謝辞

本研究は、上原記念生命科学財団の支援を得て行われたことに感謝申し上げる。さらに、研究に際しご協力を頂いた北陸先端科学技術大学院大学人工知能研究センターの岡田将吾准教授に感謝申し上げる。

文 献

1) Ohmori T, Kabata T, Kajino Y, Inoue D, Taga T, Yamamoto T, Takagi T, Yoshitani J, Ueno T, Ueoka K, Tsuchiya H. The optimal combined anteversion pattern to achieve a favorable impingement-free angle in total hip arthroplasty. J Orthop Sci. 2019 May;24(3):474-81. PMID: 30554937 DOI: 10.1016/j.jos.2018.11.008
2) Kato S, Kurokawa Y, Kabata T, Demura S, Matsubara H, Kajino Y, Okamoto Y, Kimura H, Shinmura K, Igarashi K, Shimizu T, Yonezawa N, Yokogawa N, Tsuchiya H. Improvement of locomotive syndrome with surgical treatment in patients with degenerative diseases in the lumbar spine and lower extremities: a prospective cohort study. BMC Musculoskelet Disord. 2020 Aug 3;21(1):515. PMID: 30554937 DOI: 10.1016/j.jos.2018.11.008
3) Lee Y, Shin S. The effect of body composition on gait variability varies with age: interaction by hierarchical moderated regression analysis. Int J Environ Res Public Health. 2022 Jan 21;19(3):1171. PMID: 35162200 DOI: 10.3390/ijerph1903117
4) Bolink, SA, Lenguerrand E, Brunton LR, Hinds N, Wylde V, Heyligers IC, Blom AW, Whitehouse MR, Grimm B. The association of leg length and offset reconstruction after total hip arthroplasty with clinical outcomes. Clin Biomech. 2019 Aug;68:89-95. PMID: 31177011 DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2019.05.015
5) Beauchet O, Allali G, Annweiler C, Bridenbaugh A, Assal F, Kressig RW, Herrmann FR. Gait variability among healthy adults: low and high stride-to-stride variability are both a reflection of gait stability. Gerontology. 2009;55(6):702-6. PMID: 19713694 DOI: 10.1159/000235905
6) Wada O, Asai T, Hiyama Y, Nitta S, Mizuno. Gait variability in women with hip osteoarthritis before and after total hip replacement: a prospective cohort study. Am J Phys med Rehabil. 2019 Oct;98(10):866-71. PMID: 31045874 DOI: 10.1097/PHM.0000000000001206
7) Queen RM, Butler RJ, Watters T, Kelley SS, Attarian DE, Bolognesi MP. The effect of total hip arthroplasty surgical approach on postoperative gait mechanics. J Arthroplasty. 2011 Sep;26:66-71. PMID: 21704483 DOI: 10.1016/j.arth.2011.04.033