

単眼カメラを用いた握力計測に向けた基礎検討

松本 渚紗^{1,a)} 家永 直人¹ 藤田 浩二² 杉浦 裕太^{1,b)}

概要：握力は上肢筋力だけでなく身体の状態を簡便に評価する指標であり、定期的な計測は自身の健康状態を把握するために重要である。しかし握力の計測には専用の機器が必要であり、これは一般家庭に普及されていないため日常的に握力を計測することは難しい。そこで本研究では、単眼カメラを用いて柔軟なボールを把持しているときの空気圧を推定し、握力を計測できるか検討する。撮影された二次元画像から画像処理で手指関節角度を計測し、重回帰分析にてボールの空気圧を推定する。実験の結果、手指の関節角度とボールの空気圧およびボールの空気圧とかかる力にはそれぞれ相関があるとわかった。

キーワード：握力計測, 画像処理

1. はじめに

握力測定は体力測定で実施される項目の一つであり、上肢筋力の総合的な評価に利用されている。また握力は高齢者の下肢筋力や立位バランス [18]、老年症候群の評価尺度として利用することも可能であり、骨格筋量や筋力の低下で引き起こされるサルコペニアや、筋力や活力が低下し虚弱した状態であるフレイルと関連があるとされている [11]。さらに握力に関連する筋力の低下は心血管疾患の死亡リスク [7] や骨折リスク [2] と相関があることが報告されており、リスク評価としての可能性も示唆されている。すなわち握力は全体的な身体状況を簡便に評価する指標であり、これを定期的に計測することは自身の健康状態の把握につながる。また臨床現場では、手を負傷した患者や脳卒中片麻痺患者がリハビリテーションの前後で握力を計測しており、機能回復の尺度としても握力は利用される [13]。

握力の計測にはス מדレー式握力計 [17] がよく用いられる。これは力とばねの関係を利用して握力を計測するものであり、直立姿勢で握力計を握ることで簡単に計測ができる。握力計は体育施設や健康センター、病院のような施設では普及されているが、一般家庭では普及していない。そのため日常生活における定期的な握力の計測は困難である。

そこで本研究では、一般への普及率が高いモバイル端末やスマートフォン [16] に搭載された単眼カメラを利用して、ボールを握っているときの握力を計測できるか検討す

る。単眼カメラを用いてボールを把持しているときの様子を撮影し、画像処理で指輪郭を取得する。指輪郭より指の関節角度を推定し、その値を用いて重回帰分析でボールの空気圧を推定する。推定された空気圧を握力に校正し、その値を返す。調査の結果、手指の関節角度とボールの空気圧、またボールの空気圧とかかる力にはそれぞれ相関があり、空気圧が推定できれば握力の計測が可能であるとわかった。

2. 関連研究

2.1 カメラを用いた手指姿勢の推定

非接触型の手の姿勢計測としてカメラを用いた手法がある。カメラを用いた姿勢推定は手や指にデバイスを装着しないため可動域を制限せずに計測できる。

単眼カメラで取得した2次元画像を利用した手指姿勢推定手法として、Puttapirat らは一般的な手のモデルと制約条件を考慮することによる推定システムを提案した [10]。富田らは手指画像に対し、画像形状比率と画像特徴量の2段階のデータベース探索を行うことで、手指形状を推定するシステムを開発した [15]。深層学習を用いた手法として、Wei らは画像から検出した特徴点同士の関係を推定し、関節部位を検出するという人体の姿勢推定を提案した [1]。また赤外線カメラである Leap motion [5] や 3D カメラ [9] を用いた手法がある。Sinha らは RGB 画像および深度画像を入力として深層学習を用いた手指姿勢の推定手法を提案した [12]。このようにカメラを用いた推定手法は数多く存在する。

本研究では、一般への普及率が高いモバイル端末に内蔵

¹ 慶應義塾大学大学院 理工学研究科

² 東京医科歯科大学

^{a)} nkysc.1929.r@keio.jp

^{b)} sugiura@keio.jp

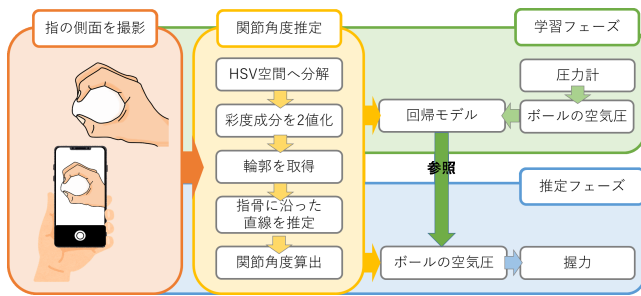


図 1 システムの構成

された単眼カメラを用いて、ボールを把持しているときの手の姿勢を簡易的に推定する。そしてボールを把持しているときの指の関節角度とボールの空気圧の関係より握力を推定する。

2.2 握力の計測

体力測定をはじめとする握力計測では、ばねと力の関係を利用して握力を計測するス מדレー式握力計がよく用いられる [17]。手に加わる力をより正確に計測する手法として、Nikonovan らは薄膜センサを利用した手全体の力分布を計測するシステムを開発した [8]。J.W.Lee は複数のカメラと感圧シートセンサを用いて、円柱状のグリップを把持するときの指関節角度および各指の力を測定するシステムを提案した [6]。またボールを把持しているときの握力計測を目的として、圧力センサと温度センサで構成されるデバイス [3] や、6 軸力覚センサを内蔵したデバイス [4] が提案されている。

以上のように握力の計測手法は数多く存在する。しかしながら計測のためには専用に開発された機器や、電子機器が内蔵された特別なボールを用意する必要がある。そこで本研究では一般に市販されている柔軟なボールと、多くのユーザが所持しているモバイル端末に内蔵された単眼カメラを利用して握力を計測し、日常生活での手軽で安価な計測を実現する。

3. 提案手法

3.1 概要

提案システムの構成を図 1 に示す。ボールを把持している様子を単眼カメラで撮影し、2 次元画像を取得する。取得画像より指の輪郭を抽出し、輪郭に沿った直線を推定することで関節角度を算出する。学習フェーズでは算出した関節角度と圧力計で測定したボールの空気圧より回帰モデルを作成する。推定フェーズでは撮影した 2 次元画像より回帰モデルを用いてボールの空気圧を推定し、握力と空気圧の関係式より握力を返す。

3.2 指の関節角度計測

柔らかいボールを握るとき、ボールにかかる力に応じて

手の形状は変化する。指の関節角度は手の形状を決定する要素の一つであり、手の形状が変わると関節角度も変化する。そのためカメラから見える範囲の指の関節角度を計測することで、ボールにかかる力を推定する。

撮影した 2 次元画像より指領域を抽出し、指の輪郭を取得する。取得した輪郭より指骨に沿った直線を順番に推定し、直線の交わる角度を関節角度として算出する。

3.2.1 手の骨と関節

母指は指先からみて末節骨、基節骨で構成されており、母指以外の指は指先から見て末節骨、中節骨、基節骨で構成されている。基節骨は手の甲にある中手骨とそれぞれつながっている。母指における末節骨と基節骨の間が IP 関節であり、母指以外の指における末節骨と中節骨の間が DIP 関節、中節骨と基節骨の間が PIP 関節である。また基節骨と中手骨の間は MP 関節である、本研究では母指の IP 関節、示指または中指の DIP 関節、PIP 関節、MP 関節を推定する。

3.2.2 画像から指輪郭の取得

撮影した 2 次元画像より手領域を抽出し、母指と示指または中指の指輪郭を取得する。本研究では手領域を抽出しやすくするため白いボールを利用し、また背景色も白に近い色に合わせた。

まずボールの円周に指を沿わせるようにボールを把持し、指の側面がカメラと垂直になる向きから指の姿勢を単眼カメラで撮影する。撮影した 2 次元 RGB 画像 (図 2a) を色相、彩度、明度の HSV 空間に分解する。手領域の彩度と、背景やボールの彩度との差分の大きさを利用して、閾値にしたがって彩度画像 (図 2b) を 2 値化する。このようにして背景とボール部分を除いた手領域 (図 2c) を取得する。

次に母指領域と示指/中指領域を分割するために境界線を決定する。取得した 2 値画像より凸包を検出し、凸性の欠陥と呼ばれる内側に窪んだ部分を検出する。凸包とは与えられた点群を凹みがないように覆った図形である。検出した凸性の欠陥のうち、凸包から凹みまでの距離が最大となるものを取得する。この凸性の欠陥において、図 2d 中の X のように凸包からの距離が最大となる画素 (以下、境界画素) と、凸包の中心画素を通る直線を算出する。この直線が手領域を 2 つに分割する境界線である (図 2d)。そして画像の左端から境界画素の間で境界線より下にある画素集合を母指領域、上にある画素集合を示指/中指の領域として分割する。図に示すように境界画素から X 離れた位置の画素を取得し、その右側および下側にある画素集合を除去することで、示指/中指の関節角度推定に必要な領域を取得する。また境界画素を通り、境界線と傾きが直交する直線から手首側の画素を除去することで、母指の関節角度推定に必要な領域を取得する (図 2e)。

取得した母指領域と示指/中指領域よりそれぞれ凸包を抽出し、指輪郭とする (図 2f)。これは母指の IP 関節お

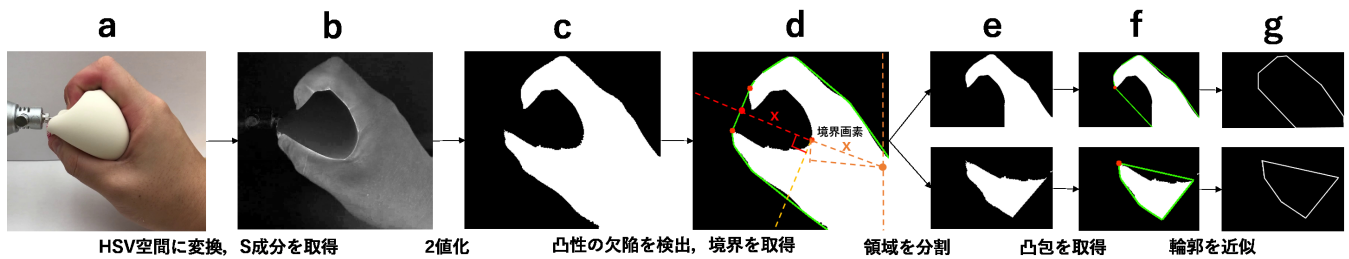


図 2 輪郭近似までの流れ

よび示指/中指の DIP 関節から爪先にかけて輪郭は内側にへこむ傾向があり、輪郭をそのまま抽出すると末節骨の輪郭が正確にとれないためである。抽出した凸包がさらに少ない点の数で表されるように輪郭を近似し (図 2g)、指の近似輪郭を構成する画素を取得する。

3.2.3 直線推定

取得した指輪郭より、指の付け根から指先に向かって輪郭に沿った直線を順番に推定する。直線推定終了後、直線の交点を関節角度として算出する。

示指/中指領域の輪郭に沿った直線推定の流れを図 3 に示す。3.2.2 節の輪郭近似処理により、近似輪郭を構成する画素は順番に取得される。例えば図 3a では A → B → C → D → E → F → G → H の順番になっている。指骨に沿った直線を推定するためには、中手骨の輪郭上の画素から末節骨の輪郭上の画素までをたどればよい。本研究では示指/中指の 3 つの関節のうち MP 関節の位置が最も右側になるように把持するため、中手骨の輪郭の始点が画像の右端にあると仮定する (図 3b-E)。そこで右端にある画素のうち最も上側にある画素を直線探索の開始位置に決定する。またボールを把持するとき指は内側に向けて屈曲するため、凸包を検出すると図 2f のように指先付近から境界画素に向けて直線が引かれる。この直線の端点は指先もしくは指の腹の位置にあたる画素となる。開始位置から順番に輪郭をたどる場合、この画素の後に続く輪郭は指骨に沿った輪郭にはならない。そこで指先もしくは指の腹にあたる画素を直線探索終了の目安の位置として決定する。以上より輪郭を開始位置から終了位置までたどることで、指骨に沿った直線を算出する。そして算出した直線のうち最初の 4 本をそれぞれ中手骨、基節骨、中節骨、末節骨に沿った

直線として取得する。例えば図 3b では E → F → G → H → A → B の順に画素をたどることになり、直線 EF が中手骨に沿ったもの、直線 FG が基節骨に沿ったものとなる。母指領域では基節骨の付け根が取得領域の下端にあると仮定し、領域の下端にある画素のうち最も左側の画素を開始位置に決定する。この仮定は本研究において母指の IP 関節が MP 関節より上になるように把持しているため成り立つ。終了位置は示指と同様の手法で決定し、開始位置から終了位置まで画素をたどり 2 本の直線を算出する。

この手法では、図 3b の C-D のように意図しない箇所が指輪郭に沿った直線として推定されることがある。これを防ぐために、探索した直線から距離 L の範囲内にある画素 (以下、直線構成画素) を数え、あらかじめ設定した必要画素数に満たない場合は指骨に沿った直線ではないと判定した (図 3c)。今回は指輪郭を構成する全画素の 1 割を必要画素数とした。また終了位置に到達するまでに推定された直線が 3 本以下の場合、推定すべき関節部分の輪郭を取得できなかったことになる。輪郭が取得できないときの関節角度を 0 度と仮定し、推定した直線の直線構成画素の割合より、どの部分の関節角度を 0 度とするか決定した。

本手法ではボールの円周上に親指が沿うような姿勢をとるため、末節骨と基節骨が水平になりやすく、輪郭は 1 つの直線に近似される。その場合、終了位置に到達する前に親指の腹にあたる輪郭を 2 本目の直線として推定する可能性がある。そこで 1 本目と 2 本目の直線の交わる角度が 90 度を超える場合、1 本目の時点で推定が終了していると仮定し、そのときの関節角度を 0 度とした。

3.2.4 単眼カメラを用いた指関節角度計測の精度評価

提案手法による指の関節角度計測の精度を評価した。撮影した画像に対してゴニオメーターを用いて計測した値を真値とし、提案手法で推定した関節角度と比較した。本実験では背景が白色の環境で母指と示指の側面をそれぞれ撮影した。親指は MP 関節、IP 関節を計測対象とし、IP 関節が 20~90 度の範囲内で 10 枚のデータセットを用意した。人差し指は MP 関節、PIP 関節、DIP 関節を計測対象とし、DIP 関節が 10~100 度の範囲内で 20 枚のデータセットを用意した。各関節において真値と推定結果の差分を絶対値にして平均化し、計測誤差を算出した。

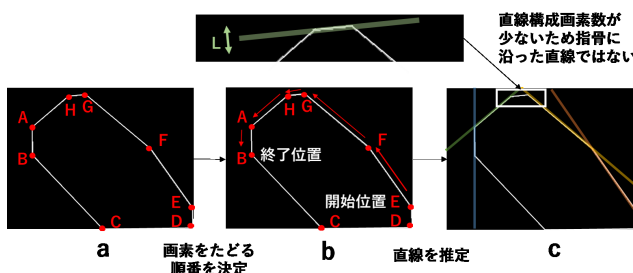


図 3 輪郭に沿った直線推定の流れ

表 1 関節ごとの平均誤差

指	関節角	平均誤差 (度)	標準偏差 (度)
母指	MP 関節	3.2	4.4
	IP 関節	5.2	2.4
示指	MP 関節	2.9	1.6
	PIP 関節	3.0	2.9
	DIP 関節	2.9	2.2

各関節角度の誤差平均は表 3.2.4 のようになり、全体の誤差平均は 3.4 度となった。先行研究で報告されている人による計測誤差は 5 度程度であることから [14]、提案手法による計測が人による計測と同程度の精度であることが示された。

3.3 回帰モデルの作成

柔らかいボールを握るとき、握る力の強さに応じて指の関節角度は変化する。そこで関節角度とボールの空気圧について重回帰分析を行い、両者の関係性を取得する。回帰分析とは 2 変数間の関係を予測するための統計的手法の一つであり、1 つの説明変数と 1 つの目的変数の関係式を表す回帰モデルを算出する。また重回帰分析とは複数の説明変数と 1 つの目的変数の関係式を算出するものである。

本研究では学習フェーズにて、ボールを把持しているときの指の関節角度とボールの空気圧より回帰モデルを作成する。推定フェーズにて回帰モデルより指の関節角度からボールの空気圧を推定する。ボールは直径 66mm の KENKO のソフトテニスボールを利用し、ボールの空気圧は molten のミニポンプ付きデジタル圧力計で計測した。

3.4 ボールの空気圧とかかる力の関係

推定フェーズにてボールの空気圧から握力を推定するため、空気圧とボールにかかる力の関係性を図 4a に示す計測装置を用いて調査した。装置は 8 本のフレームとアクリル板で構成されている。底面に設置した 4 本のフレームはお互いに止め金具で固定されており、底面に対して垂直方向の 4 本のフレームは底面の 4 隅と止め金具で固定されている。垂直方向のフレームには、内側に突起が向いた金具が上下に動くように設置されている。この 4 つの突起の上にアクリル板を固定させ、アクリル板が平行を保ったまま上下に動くようにした。

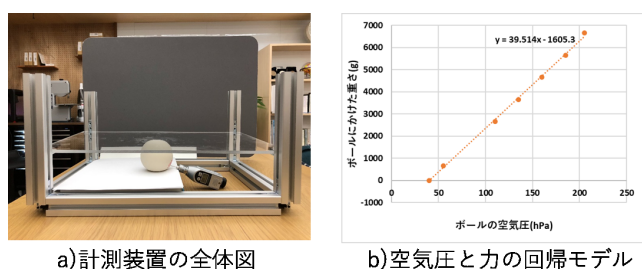


図 4 計測装置の外観と作成した回帰モデル

アクリル板と底面の間にボールを配置し、アクリル板に重りをのせていくことでボールにかかる力と空気圧の関係性を調査した。ボールの下に本を置き、圧力計が計測を妨げない位置になるように高さを調節した。重りには 535g の 500mL ペットボトルと 2105g の 2L ペットボトルを利用した。アクリル板と金具の重さは合わせて 784g であった。

計測データと回帰分析より算出した回帰モデルを図 4b に示す。決定係数は 0.998 となった。両者には相関があり、ボールの空気圧を握力に校正できることがわかった。

4. 実験

4.1 実験概要

ボールを把持しているときの指の関節角度と、ボールの空気圧の関係性を調査した。実験参加者は 4 名（男性 3 名、女性 1 名、20 代学生）である。参加者はボールを握る一番外側の指輪郭が手前の指で隠れないようにボールを把持し、指の側面がカメラに対して垂直に向くように姿勢を維持した。このときカメラの撮影範囲に手とボール、圧力計がすべて入るように奥行きを調整した。参加者は計測が始まる前に、5 指をバランスよく使ってボールを握り、緩めるという一連の動作を数回練習した。この動作の練習後、参加者はボールの空気圧が最大 300hPa となる範囲内でボールを強く握り、緩めるという一連の動作を 3~5 秒程度かけて行い、その様子を動画に記録した。この動作を 5 回繰り返した。なおボールが握られていないときの空気圧は 40hPa にそろえた。

計測終了後、撮影した動画を 2 フレームごとに切り出し、動画 15 秒程度にあたる 240 枚の連続した画像データを用意した。各画像より母指と示指/中指の関節角度と圧力計の値を取得し、参加者ごとに 240 組のデータセットを取得した。指の関節角度は提案手法により計測した。取得したデータセットに対し、参加者ごとに回帰モデルを作成した場合、参加者ごとに連続する 60 組のデータを抽出して参加者全体の回帰モデルを作成した場合の決定係数、標準偏差および標準偏回帰係数について検討した。決定係数とは回帰モデルの当てはまりの良さを表す尺度であり、標準偏回帰係数とは重回帰分析における各変数の影響を表す尺度である。

4.2 結果

参加者ごとに作成した回帰モデルの決定係数および標準偏回帰係数を表 2 に、推定エラーが生じたデータを除いた結果を表 3 に示す。推定エラー率とは適切な関節角度を取得できなかったデータの割合を示す。なお推定エラーが生じたデータセットを除いても計測範囲は変わらなかった。

参加者ごとに回帰モデルを作成した場合の決定係数の平均は 0.830 となり、標準偏差の平均は 30.91 であった。参加者全体で回帰モデルを作成した場合の決定係数は 0.733

表 2 参加者ごとの決定係数と標準偏回帰係数

実験参加者	決定係数	標準偏差	標準偏回帰係数				推定エラー率 (%)		
			MP	PIP	DIP	IP	母指	示指/中指	データセット全体
A	0.864	36.06	-2.27	-1.03	7.08	-1.56	1.3	1.3	2.9
B	0.872	25.77	-2.90	2.03	1.82	1.57	0	1.7	1.7
C	0.836	28.97	-4.20	3.28	1.56	0.11	33.3	0	33.3
D	0.748	32.85	1.03	-0.43	3.74	-0.45	13.3	23.3	34.6

表 3 推定エラーを含めない場合の決定係数と標準偏回帰係数

実験参加者	決定係数	標準偏差	標準偏回帰係数			
			MP	PIP	DIP	IP
A	0.930	25.76	-0.92	-0.83	6.73	-2.44
B	0.940	17.59	-2.96	2.20	2.02	1.06
C	0.859	23.30	-3.68	2.39	1.84	0.50
D	0.831	23.41	0.16	-2.16	5.67	1.64

となり、標準偏差は 40.94 であった。また推定エラーを除いたデータセットより、参加者ごとに回帰モデルを作成した場合の標準偏差の平均は 22.52 となり、参加者全体で回帰モデルを作成した場合の標準偏差は 29.21 となった。標準偏回帰係数は平均して DIP 関節、PIP 関節、IP 関節、MP 関節の順に大きく、DIP 関節の影響が最も強かった。

4.3 考察

推定に失敗したデータセットを除くと標準偏差が小さくなった。これは関節角度推定の向上がばらつききの低い回帰モデルの作成につながることを示している。参加者 C は母指の推定エラー率が高く、参加者 D は母指と示指/中指の推定エラー率が高かった。参加者 C はカメラに対して垂直の向きに母指を動かしていたため、母指の末節骨がカメラから見えなくなり、正確な輪郭を取得できなかったためと考えられる。また参加者 D の指を側面からみたとき、ほかの参加者に比べて指の輪郭がゆるやかなカーブになる傾向があった。そのため指輪郭を近似したときに指骨に沿った輪郭が直線ではなく 2 つの直線で構成される角に近似されてしまったと推測される。そのため関節角度推定の向上には、個人の指の形状を考慮して輪郭を取得する必要がある。また、単眼カメラ以外の日常的に利用されるデバイスを用いた手指姿勢推定について比較検討すべきである。

参加者 C と参加者 D の全体の推定エラー率は同程度にも関わらず、参加者 D における相関はほかの参加者に比べて低い結果となった。これは回帰モデルに強い影響を与える変数の値を適切に取得できなかったためと考えられる。参加者 C は影響の低い IP 関節について推定エラーが発生しても相関関係への影響が低かったが、参加者 D は影響の高い DIP 関節、IP 関節が適切に取得できなかったことが相関関係に影響したと読み取れる。

また個人ごとに回帰モデルを作成した方が、参加者全体で回帰モデルを作成したときよりも標準偏差が小さくなっ

た。参加者に応じて空気圧推定への影響度が強い関節角度が異なることから、ボールに力を加えるときの指の姿勢や関節角度の変化には個人差があることが読み取れる。日常における握力計測に必要な精度を調査したうえで、個人差を考慮して個人ごとに回帰モデルを作成すべきか、また複数人のデータから回帰モデルを作成すべきか検討する必要がある。

5. 制約・課題と今後の展望

5.1 制約

本提案手法による関節角度推定は、推定する指の輪郭が正確に取得できることを前提としている。そのため推定したい指の輪郭に、奥側の指や手前側の指が重ならないような姿勢をとる必要があり、ユーザが持ち方を調整しなければならない。さらに画像から手領域の抽出を容易にするため、把持するボールと背景を同色に合わせたうえで、皮膚の色から離れた色相にする必要がある。

ボールへ力をかける姿勢は使う指や持ち方に依って変化する。本研究ではボールを持つ姿勢や握り方が大きく変わらないことを前提としているため、姿勢を変えると握力が正しく推定されない。そのため握り方が常に一定になるようにユーザに意識してもらうことが必要である。

5.2 課題と今後の展望

本実験では 40hPa~300hPa の範囲内における指の関節角度とボールの空気圧について調査した。これはボールの空気圧が 300hPa 以上になるように力を加えると、指の一部がボールに埋まってカメラから見えなくなるためである。しかし計測可能範囲に上限があると適切な握力を測ることができない。今後の研究ではソフトテニスボールが握



図 5 スマートフォンで握力計測をする様子

られていないときの空気圧と、そのときの最大計測可能握力について検討する。ボール内の空気圧が大きいほどボールを変形させるために必要な力は大きくなるため、ユーザに応じて適切な計測可能範囲を提供できる可能性がある。

今後は実際に推定された空気圧から握力へと校正し、算出された握力について検討する(図5)。また脳卒中患者は指のリハビリとして円筒系や球状の物体を握る訓練をしており[4]、本システムは特に在宅でのリハビリテーションに利用できる可能性がある。そこで今後はボールの把持動作に応じてフィードバックを返すシステムを開発する。

6. おわりに

握力は身体の総括的な健康状態を反映する指標であり、定期的な計測は自らの健康の把握につながる。しかし握力計測機器は一般家庭には普及しておらず、日常での継続的な計測は難しい。そこで本研究では単眼カメラを利用してボールを把持しているときの指の関節角度を推定し、関節角度とボールの空気圧の関係性を調査した。実験より個人ごとに回帰モデルを作成した場合の決定係数の平均は0.830となり、指の関節角度と空気圧には相関があることがわかった。またボールの空気圧とかかる力にも相関が認められ、空気圧を推定できれば握力が計測できるとわかった。今後は計測誤差の低減と計測範囲の拡大、およびリハビリテーションシステムへの応用を提案する。

謝辞 本研究はJST PRESTO JPMJPR17J4の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Cao, Z., Simon, T., Wei, S.-E. and Sheikh, Y.: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields, *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2017).
- [2] Fujita, K., Kaburagi, H., Nimura, A., Miyamoto, T., Wakabayashi, Y., Seki, Y., Aoyama, H., Shimura, H., Kato, R. and Okawa, A.: Lower grip strength and dynamic body balance in women with distal radial fractures, *Osteoporosis International*, Vol. 30 (online), DOI: 10.1007/s00198-018-04816-4 (2019).
- [3] Jaber, R., Hewson, D. J. and Duchêne, J.: Design and validation of the Grip-ball for measurement of hand grip strength, *Medical Engineering & Physics*, Vol. 34, No. 9, pp. 1356 – 1361 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2012.07.001> (2012).
- [4] Kim, H.-M. and Kim, G.-S.: Judgment Method of the Rehabilitation Extent using a Spherical Type Digital Finger Force Measuring System (2014).
- [5] LEAPMOTION: Leap Motion, LEAP MOTION (online), available from (<https://www.leapmotion.com/>) (accessed 2019-07-16).
- [6] Lee, J. and Rim, K.: Measurement of finger joint angles and maximum finger forces during cylinder grip activity, *Journal of Biomedical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 152 – 162 (online), DOI: [https://doi.org/10.1016/0141-5425\(91\)90062-C](https://doi.org/10.1016/0141-5425(91)90062-C) (1991).
- [7] Leong, D., Teo, K., Rangarajan, S., Lopez-Jaramillo, P., Avezum, A., Orlandini, A., Seron, P., H Ahmed, S., Rosengren, A., Kelishadi, R., Rahman, O., Swaminathan, S., Iqbal, R., Gupta, R., A Lear, S., Oguz, A., Yusoff, K., ZatoĎska, K., Chifamba, J. and Yusuf, S.: Prognostic value of grip strength: Findings from the Prospective Urban Rural Epidemiology (PURE) study, *Lancet*, Vol. 386 (online), DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62000-6 (2015).
- [8] Nikonovas, A., J L Harrison, A., Hoult, S. and Sammut, D.: The application of force-sensing resistor sensors for measuring forces developed by the human hand, *the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of engineering in medicine*, Vol. 218, pp. 121–126 (online), DOI: 10.1243/095441104322984013 (2004).
- [9] Pham, T., Pathirana, P. N., Trinh, H. and Fay, P.: A Non-Contact Measurement System for the Range of Motion of the Hand, *Sensors*, Vol. 15, No. 8, pp. 18315–18333 (online), DOI: 10.3390/s150818315 (2015).
- [10] Puttapirat, P. and Charoenpong, T.: Hand posture estimation from 2D image sequence by hand landmark identification, *2017 9th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, pp. 294–298 (online), DOI: 10.1109/KST.2017.7886088 (2017).
- [11] Roberts, H. C., Denison, H. J., Martin, H. J., Patel, H. P., Syddall, H., Cooper, C. and Sayer, A. A.: A review of the measurement of grip strength in clinical and epidemiological studies: towards a standardised approach, *Age and Ageing*, Vol. 40, No. 4, pp. 423–429 (online), DOI: 10.1093/ageing/afr051 (2011).
- [12] Sinha, A., Choi, C. and Ramani, K.: Deep-Hand: Robust Hand Pose Estimation by Completing a Matrix Imputed with Deep Features, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4150–4158 (online), DOI: 10.1109/CVPR.2016.450 (2016).
- [13] Sunderland, A., Tinson, D., Bradley, L. and Hower, R. L.: Arm function after stroke. An evaluation of grip strength as a measure of recovery and a prognostic indicator., *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, Vol. 52, No. 11, pp. 1267–1272 (online), DOI: 10.1136/jnnp.52.11.1267 (1989).
- [14] 宮前珠子: 関節可動域テストの信頼性, 理作療法, Vol. 12, No. 2, pp. 139–144 (オンライン), <https://ci.nii.ac.jp/naid/10026344852/> (1978).
- [15] 富田元将, 星野 聖: 前腕を含む手指画像からの3次元手指形状推定, 映像情報メディア学会誌, Vol. 63, No. 6, pp. 822–828 (オンライン), DOI: 10.3169/itej.63.822 (2009).
- [16] 総務省: 平成30年版 情報通信白書 情報通信機器の保有状況, 総務省 (オンライン), 入手先 (<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd252110.html>) (参照 2019-07-16).
- [17] 公益財団法人長寿科学振興財団: 健康長寿ネット 正確な握力の測定方法, 公益財団法人長寿科学振興財 (オンライン), 入手先 (<https://www.tyojyu.or.jp/net/kenkou-tyoju/tairyoku-kiki/akuryoku.html>) (参照 2019-07-16).
- [18] 池田 望, 村田 伸, 大田尾浩, 村田 潤, 堀江 淳, 溝田勝彦: 地域在住女性高齢者の握力と身体機能との関係, 理学療法科学, Vol. 26, No. 2, pp. 255–258 (オンライン), DOI: 10.1589/rika.26.255 (2011).