

モーションキャプチャーの医療への応用研究

平成29年（2017年）4月～令和2年（2020年）3月

研究代表者

松下 宗一郎（コンピュータサイエンス学部・教授）

共同研究者

亀田 弘之（コンピュータサイエンス学部・教授）

相田 紗織（コンピュータサイエンス学部・助教）

篠原 一彦（医療保健学部臨床工学科・教授）

伊藤 奈々（医療保健学部臨床工学科・助教）

加納 敬（医療保健学部臨床工学科・助教）

1. 研究の目的

利用者が手に持ったり、腕時計等にて身体に装着して用いる小型軽量かつセキュアなウェアラブルセンサ情報処理デバイスにより、いつでもどこでも手軽に利用できる医療 IoT 向けモーションキャプチャーシステムの研究開発を行う。具体的には、

- (1) 医療現場にて安全に適用することのできる運動状態計測デバイスの検証
- (2) 医療におけるモーションキャプチャー応用アプリケーションの提案
- (3) 医療現場におけるモーションキャプチャー応用システムの試験運用

といった段階を通じて、有用なデータの収集とその解釈を進めていく。最終的には在宅医療や介護といった病院外での状況における利用者の情報をネットワーク等を通じて収集し、従来見過ごされてきた健康管理上の知見を効果的に提示する情報サービスを提供する医療 IoT 技術の確立を目指す。

2. 研究計画

初年度（平成29年度）

小型運動解析デバイスを製作し、医療保健学部と共同にて医療現場での適用の可能性を検証する。また、日常生活において利用可能な運動センサを含めた人体向けセンサに関する調査を実施する。

第2年度（平成30年度）

引き続き小型運動解析デバイスの医療現場における適用可能性の検証を行うとともに、治験の有効性を検証することのできる体制をつくる。具体的には、デバイスによる計測情報を適切にアノテーションする手法を開発し、データを効率的に構造化するシステムを製作する。

第3年度（平成31年度）

モーションキャプチャーシステムが適用可能と判断されるアプリケーションについて、ビッグデータの解析手法を用いたセキュアなサービス検証システムの構築ならびに試験運用を学内にて実施する。

3. 研究成果

3.1. 小型運動解析デバイスの研究開発

本プロジェクトでは、小型の電子回路基板を3DプリンタによるABSプラスチック樹脂ケースや市販のケースを加工した筐体に組み込む形で、表1に示す運動解析デバイスの設計・製作を行った。

表1 共同プロジェクトにて製作を行った運動解析デバイス

型式番号	CCP-X-21	CCP-X-22	CCP-X-23	CCP-X-25
稼働開始	2016年8月	2017年4月	2017年7月	2019年11月
使用センサ	Invensense MPU-6050 6軸 IMU (3軸加速度+3軸角速度)	Invensense MPU-6050 6軸 IMU	Invensens MPU-9250 9軸 IMU (6軸+磁場3軸)	TDK-Invensense ICM-20602 6軸 IMU
筐体サイズ (W×D×H)	55×40×20 (mm)	55×40×20 (mm)	48×38×10 (mm)	46×38×10 (mm)
総重量 (腕時計型)	約60グラム (250mAh battery)	約65グラム (250mAh battery)	約40グラム (110mAh battery)	約37グラム (110mAh battery)
データ収集	ワイヤレス	16GB μSD	16GB μSD	16GB μSD
製造台数	6台	4台	50台	100台
備考	東京工科大学 医療保健学部等にて運用	東京大学医学部 附属病院消化管外科等にて運用	3Dプリンタ及び専用回路基板による小型化	低消費電力化により連続45時間利用可能



図1 腕時計型運動解析デバイス

CCP-X-21は本共同プロジェクトを開始する上でのプロトタイプとなったデバイスであり、3軸加速度(±4G、Gは重力加速度 $\sim 9.8\text{m/s}^2$)、3軸角速度(±1000dps、1秒あたり回転角度)を計測する市販の集積回路チップを使用している。デバイスで取得した運動データはワイヤレス通信(2.4GHz, IEEE802.14.5)にて近距離(40m以内)に置かれたノートPC等に伝送され、運動記録ならびにリアルタイムでのデータ分析表示を行うことができる。一方で、CCP-X-21ではワイヤレス通信におけるデータ欠損が生じる他、ノートPC等の外部デバイスが必要となることから、いつでもどこでも手軽にデータを取得することを目的としたデバイスの開発を行った。CCP-X-22以降のデバイスでは、運動データは市販のマイクロSDメモ리카ードに記録されており、16GB容量のカードでは連続100日以上データの保存が可能である。また、デバイスの操作は電源スイッチ1つのみであり、研究開発担当者が同伴できない環境にて運用することができる。そして、本共同プロジェクト開始後の平成29年(2017年)7月に

は専用電子回路基板並びに3Dプリンタによる筐体を用いたデバイスの小規模量産を行い、成人男性用腕時計の半分以下程度の重量にて日常生活での利用が十分に可能である運動解析デバイスを実現している。図1は専用電子回路基板を使用する前後でのデバイスの外形を示したものであるが、薄型化によりCCP-X-23では市販の腕時計とほぼ同じ装着感を達成した。更には、間接接触式の電源スイッチを用いることで、CCP-X-25にて防水性といった耐環境性を実現している。

続いて、本共同プロジェクトの大きな特徴の1つである「モーションキャプチャー」について、研究開発の経緯と状況を以下に概説する。加速度、角速度といった慣性運動計測信号を用いたモーションキャプチャーでは、センサが持つ計測誤差による影響が大きくなる。ここで、計測誤差の大部分を占めているのがセンサ特性の温度依存性ならびに経時変化であるが、前者については新たに開発を行った特性キャリブレーション計算の手法により、影響の大幅な軽減を実現した。また、後者の経時変化については、カルマンフィルタに類似した線形誤差予測の手法により、センサデバイスにわずかな静止時間があれば、モーションキャプチャーによる姿勢角計測の絶対誤差を概ね1度以内に留めることができた。

以上により、本共同プロジェクトにおける研究開発目標であった、「医療現場にて安全に適用することのできる運動状態計測デバイスの検証」については、小型軽量かつ操作が容易な運動解析デバイスの開発により達成されたものと考えている。

3.2. 医療におけるモーションキャプチャー応用アプリケーションの検討

本共同研究プロジェクトでは、腕時計型運動解析デバイスを中心に、利用者の身体の様々な部位に装着する応用アプリケーションの研究開発を行ってきた。ここでは、外科医といった医療従事者を対象とする事例と、一般利用者が健康管理の目的で使用する事例について報告を行っていく。

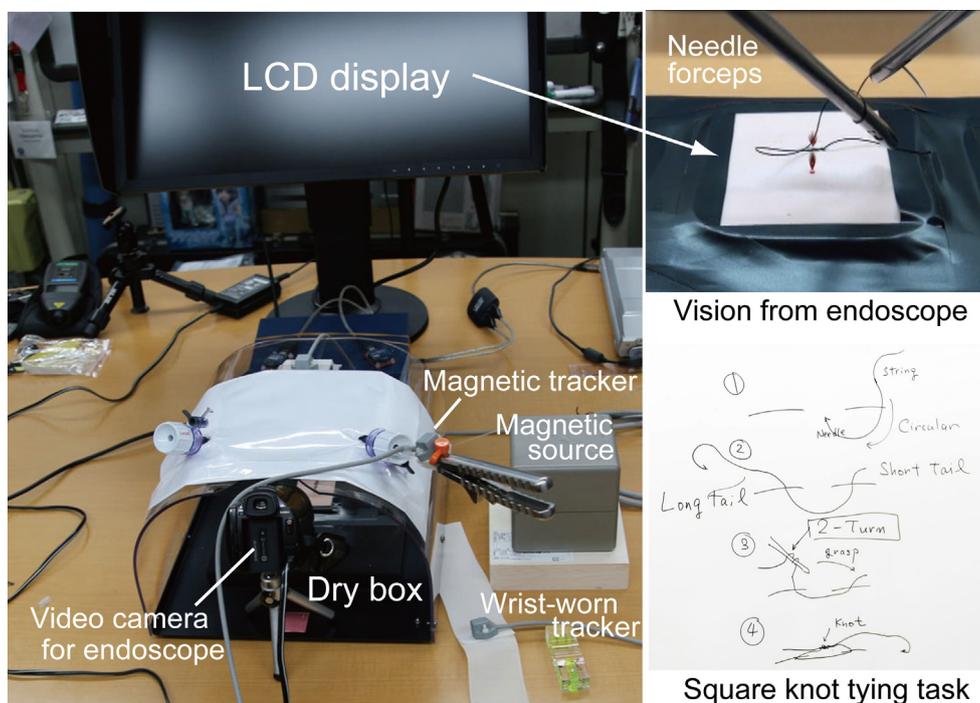


図2 ドライボックスを用いた腹腔鏡下での鉗子操作トレーニングシステム

3.2.1 腹腔鏡下鉗子操作技量の定量推定アプリケーション

内視鏡下における外科手術鉗子の操作では、開腹手術と比べて術者に高い技量が必要とされており、日本内視鏡外科学会ではビデオ判定を用いた技術認定医の制度を運用している。そこで本学内プロジェ

クトでは、学内に図2に示すようなドライボックスと呼ばれる腹腔鏡下手術のシミュレーション環境を構築し、施術者の両手首に運動解析デバイス（CCP-X-21型）を装着した状態にて、スクウェアノットの技法による縫合・結紮術のモニタリングを試みた。この実験には東京大学大学院医学系研究科より外科医師1名が指導医として参加し、非医療従事者であるコンピュータサイエンス学部の学生8名による定期的な縫合・結紮トレーニングを8週間にわたり実施した。この結果、モーションキャプチャーの計算原理によって得られた手首の姿勢角度変動量の時間積算値において、図3に示すような学習曲線が得られた。ここでは、指導医においては左右の手がほぼ均等に運動しているのに対し、非医療従事者である初学者では非利き手側の運動に対する時間積算値が顕著に小さくなっていることが分かった。

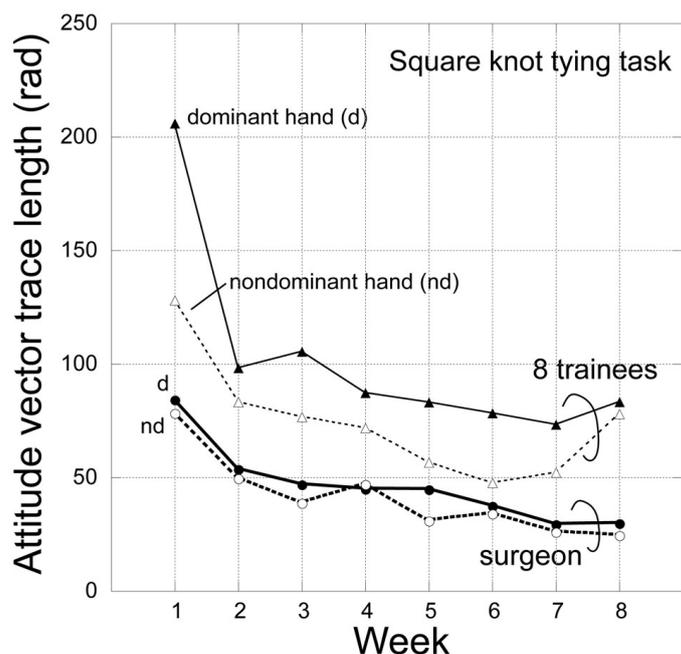


図3 運動解析デバイスによる鉗子操作技量学習曲線

3.2.2 眼鏡装着型日常生活モニタリングシステム

図4に示すような運動解析デバイスを視力矯正用の眼鏡に装着し、日常生活における頭部の運動モニタリングを試みた。ここでは、デバイス（CCP-X-23型）の姿勢角によって装着者の視線方向（特に上下角）を正確に推定できることに加え、図5に示す摂食時に頭部に生じる特徴的な回転運動領域の情報から、生活の中で、食事を摂っていた時間帯を特定することができた。また、休憩の取得や、活発に会話をしていることを反映する運動特徴量が見つかり、これらを総合することで生活における活動内容を推定できる可能性が見出された。

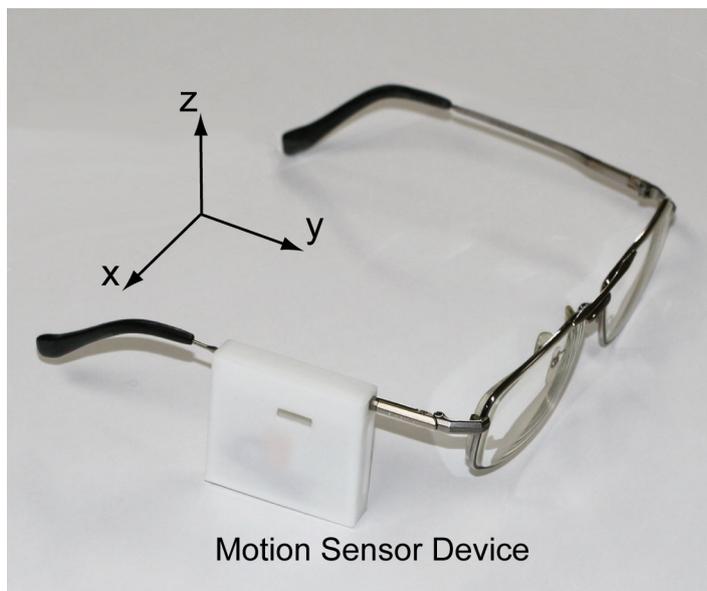


図4 メガネ装着型運動解析デバイス

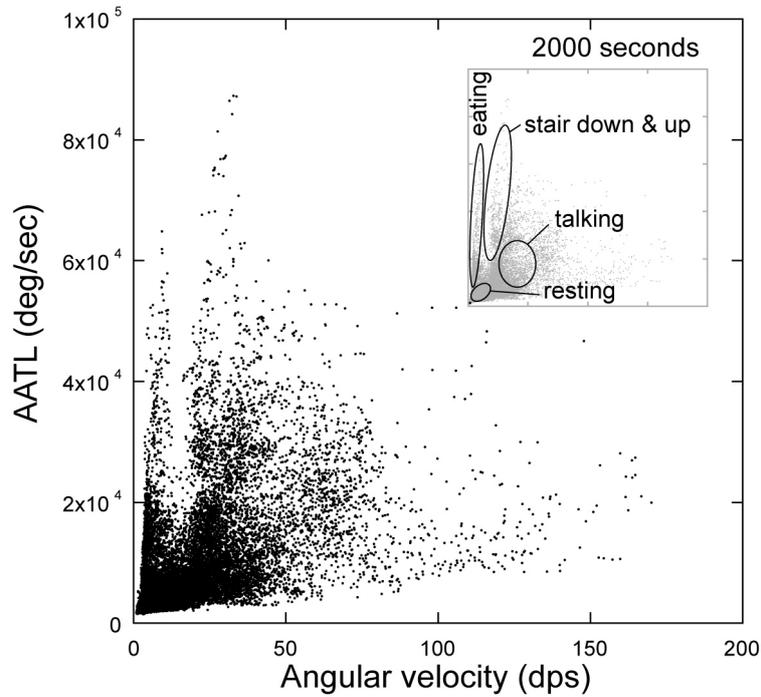


図5 運動信号の数値分布を用いた装着者の行動推定

3.2.3 ひざ下装着型歩行姿勢モニタリングシステム

歩行運動は日常生活における健康度を推定する際の有力な観測対象であるが、腕時計のように運動解析センサを安定して設置できる場所が少ないことが問題となっている。そこで、単に加速度や角速度を計測するのではなく、モーションキャプチャー演算を行うことができる本共同プロジェクトによるデバイスの特性を利用し、図6に示すひざ下位置に設置したセンサ（CCP-X-21型およびCCP-X-23型）の取り付け角度を推定するシステムの検証を行った。その結果、歩行運動に伴う足のひざ下部分における運動制約条件から、図7に示すように、歩行によって変化したセンサ装着位置の変化を動的に推定できることが分かった。そして、足のひざ下部分の振り上げ角度を精度良く推定することで、日常生活における歩行運動健全性評価の可能性が見出された。

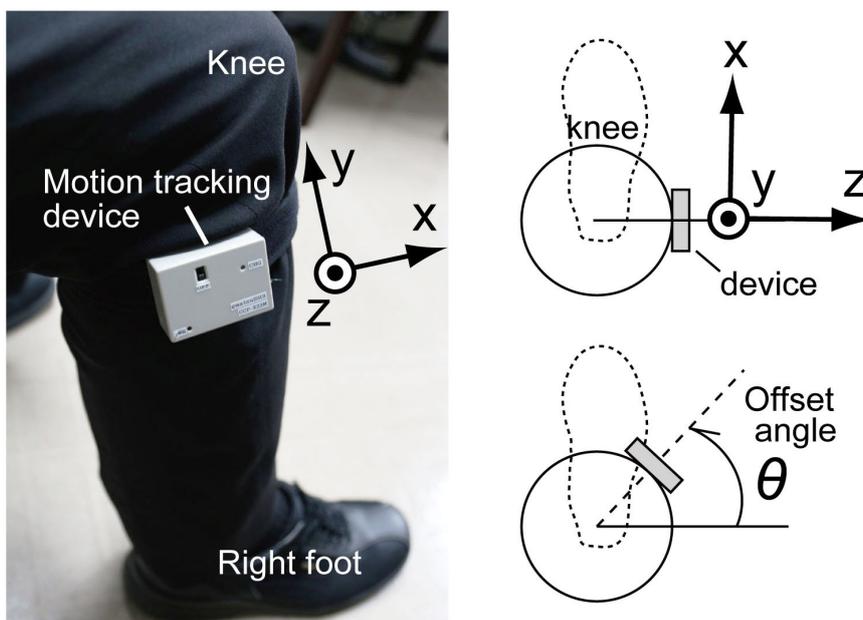


図6 利用者のひざ下に設置した運動解析センサによる歩行運動分析システム

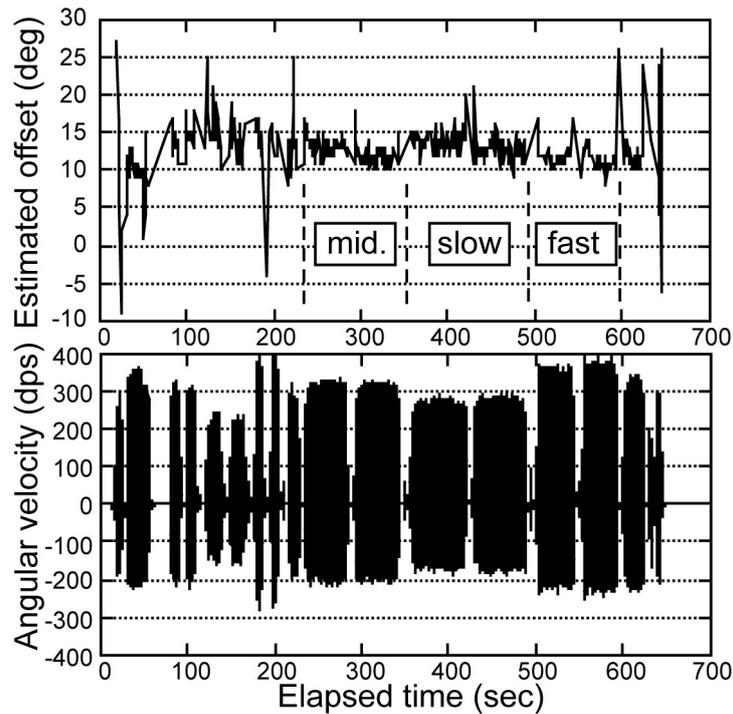


図7 歩行時におけるセンサ取り付け角変位の推定結果

3.3. モーションキャプチャー応用システムの試験運用

本共同プロジェクトにおける検討結果により、小型軽量な運動解析デバイスをモーションキャプチャーの原理とともに使用することで得られた有用な運動パラメータを表2に列挙する。

表2 医療応用において有用な運動パラメータ

パラメータ	AATL	STL	Lacc	AATLw
	角加速度ベクトル軌跡長 Angular Acceleration vector Trace Length	姿勢角ベクトル空間軌跡長 Spherical vector Trace Length	リニア加速度 Linear acceleration	角速度で正規化した AATL AATL normalized by ω
特徴	角速度の時間二階微分値 から回転運動のスムーズ さを表現する	姿勢角変化の時間積算値か ら運動の大きさを表現する	重力を消去した加速 度から運動加速度の 大きさを表現する	運動フォームの滑らかさ を運動速度に依存せずに 表現する
用途の例	腹腔鏡下での鉗子操作の スムーズさを推定	腹腔鏡下での鉗子操作運動 量の推定	手の運動の「力み」 の大きさを推定	頭部に設置したセンサに よる摂食行動の判別

これらの運動パラメータに関する知見をもとに、実験被験者に貸し出した運動解析デバイスによるデータ収集を試験運用として行い、得られる知見についての検討を実施した。

3.3.1 医療機関における腹腔鏡下鉗子操作技量の推定実験

東京大学大学院医学系研究科消化管外科における14名の外科医師の協力を頂き、東京大学附属病院内にて両手首に装着する腕時計型モーションキャプチャーデバイス（CCP-X-22型）によるドライボックス下での腸管結紮・縫合タスクの計測を行った。ここで、使用した運動解析デバイスの操作は電源スイッチのみで行えることから、同病院にデバイスを貸し出し、日常的な医療業務の合間に短時間（1分間～

最長にて10分間程度)の縫合・結紮タスクを実施した。また、運動計測と並行して腹腔鏡のモニタ画像のビデオ録画を行い、3名の日本内視鏡学会技術認定医による5段階での技量判定を、縫合、結紮、鉗子による手術針の持ち方、総合の4項目にて実施している。

表3 技術認定医のビデオ評価スコアと運動パラメータの相関関係

Evaluation score	Task time			Whole task			
	Suture	Ligation	Whole	Twist STL		Tilt STL	
				Right	Left	Right	Left
Suture	-0.79	-0.62	-0.73	-0.64	-0.55	-0.62	-0.62
Ligation	-0.39	-0.74	-0.68	-0.59	-0.62	-0.69	-0.71
Needle holding	-0.73	-0.27	-0.36	-0.32	-0.22	-0.35	-0.36
Overall	-0.61	-0.71	-0.73	-0.62	-0.64	-0.69	-0.71

実験の結果を表3に示す。従来の技量評価指標である縫合・結紮における施術操作時間に加え、手首姿勢角ベクトルの空間軌跡積算長であるSTLパラメータについて、ビデオ録画判定による評価スコアとの間にかなり強い相関性が見られることが分かった。

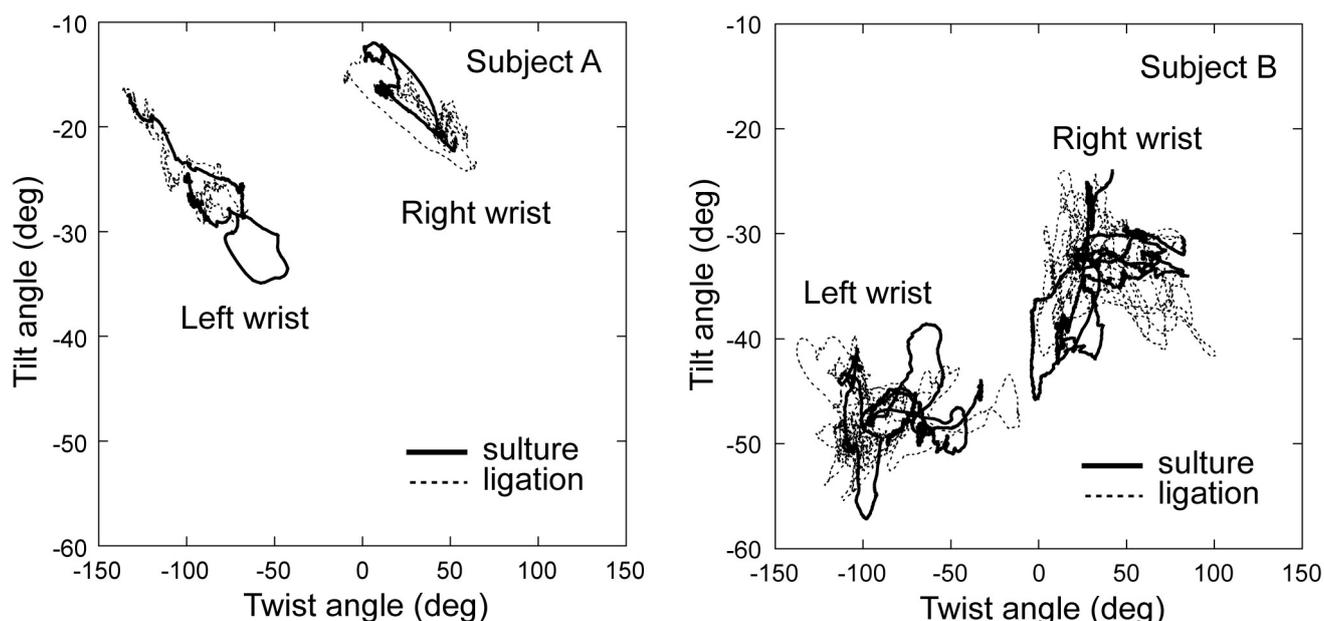


図8 技術認定医と未認定医による手術鉗子操作技量の違い

ここで、モーションキャプチャーによって得られた施術者の両手首の空間姿勢角の推移を1枚の画像としてプロットしたところ、ビデオ判定にて高評価であった日本内視鏡外科学会技術認定医 (SubjectA) と、未認定医 (SubjectB) の間に顕著な差異が見られることが分かった。すなわち、技術認定医では手首姿勢角の変化が狭い角度範囲にて生じているのに対し、未認定医では手首姿勢角が広範囲かつ不規則に変化していた。そこで、手首姿勢角変化のスムーズさを表現する数値としてAATLwを始めとする角速度時間二階微分値由来のパラメータの検討を行った。この結果、従来は四肢麻痺リハビリテーションの分野にて有効性が知られていたAS (Angular Smoothness) と呼ばれる無次元化された運動パラメータについて、図9に示すようにビデオ判定スコアとの間に高い相関が見られることが分かった。

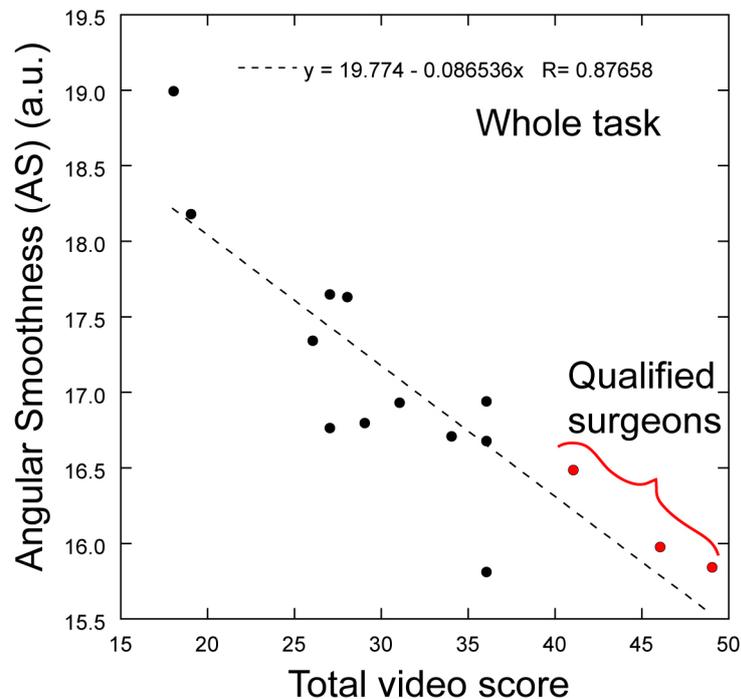


図9 ビデオ判定スコアと運動パラメータの相関関係

以上のような結果から、モーションキャプチャーの原理による運動解析デバイスを医療の現場にて用いることで、次のような効果が得られることが分かった。

- (1) ビデオをリプレイすることなく、腹腔鏡下での手術鉗子操作の様子を1枚の画像として概観することができる。
- (2) 従来はタスク時間による1次評価が行われていたが、AATLwやAS等の角速度二階微分ベクトル由来の数値を評価パラメータとして加えることで、施術運動の質についてのより詳細な評価が可能となる。

腹腔鏡をはじめとする内視鏡下での施術技量については、医療従事者が自宅等にてトレーニングを継続的に行っているケースが少なからず存在していることから、習得が困難である鉗子操作技量の向上をサポートするシステムとして、本共同プロジェクトによる研究成果は有用であると考えられる。

3.3.2 エレクトリックギター演奏技巧の獲得に向けた日常的なトレーニング支援実験

手を用いる楽器の演奏技巧では、日常生活には見られない身体の可動域やスピードを必要とするものが散在している。そのような中で、特に「速弾き」と呼ばれる技巧では、無理な運動による上達の阻害や負傷といった好ましくない事態を招くことが認知されつつある。また、オンラインでの遠隔指導といった形での技巧トレーニングでは、ビデオ映像や音響だけでは伝わらない身体運動に関わる情報伝達が難しくなることから、本共同プロジェクトによる運動解析デバイスの適用が有効である可能性がある。そこで、図10に示すような腕時計型デバイスをエレクトリックギター演奏者の利き手側に装着し、演奏運動を詳細に解析するアプリケーションの検討を行った。ここでは、演奏中にリアルタイムでの解析結果をフィードバックするシステムを、ワイヤレス通信機能を有するCCP-X-21型デバイスにて構築し、超高速ダウンピッキングと呼ばれるロックギター奏法をモチーフとした被験者実験を実施した。そして、モーションキャプチャー演算によるリニア加速度の極大値から、「カミ」の度合いを計測するとともに、

角速度信号の極大値を用いた演奏リズムの推定結果から、既にこの演奏技巧を修得している演奏者の数値を基準としたトレーニングシステムを作成した。このシステムでは、図11に示すように、目標となる演奏スピードを達成しつつ、回転運動のスムーズさ (distortion) と、力みの大きさ (acc-peak) が基準値を満たしたことをノート PC の画面に表示している。8名の高速ダウンピッキング奏法未修得者によるシステムの自主利用実験を行ったところ、数日間といった短期間にて5名の被験者が目標数値を達成することができた。また、運動パラメータの時間推移を調べたところ、多くの被験者が回転運動のスムーズさを獲得しつつ、力みを低下させていく様子が観測されている。

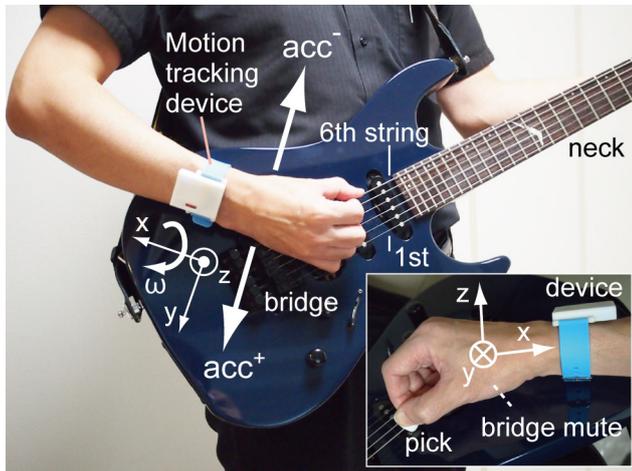


図10 ギター演奏運動分析システム



target speed selector and qualification marks

図11 高速ダウンピッキング奏法評価システム

3.3.3 ネットワークを経由したビッグデータ収集システムの検討

本共同プロジェクトでは、医療従事者や入院中の患者に加え、自宅療養や日常的な健康管理といった幅広い利用者からのデータを効率的に収集し、適切な運動データアノテーションのもとで機械学習等に用いる効果的なデータベースを低コストかつ低負担にて構築することを最終的には目指している。そこで、最も広範な利用者に有効なアプリケーションを提供することができるという視点から、腕時計型の運動解析デバイスの適用を考え、大学内の情報ネットワークシステムの1つである Moodle や Google drive 等を利用したデータ収集実験を実施している。

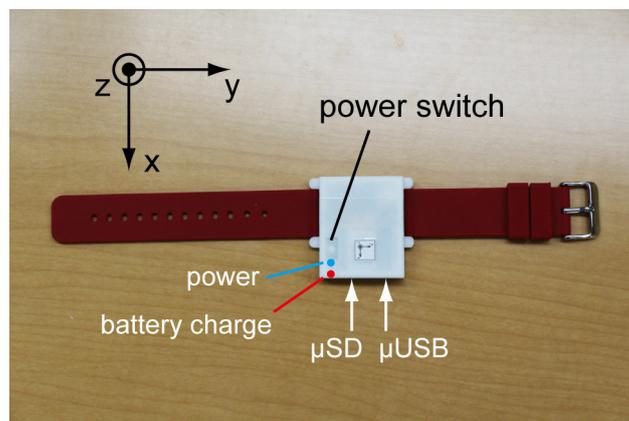


図12 CCP-X-25 高耐候性運動解析デバイス

この実験では、プロジェクトにて開発を行った小型軽量かつ耐候性の高いデバイスである CCP-X-25 を主に使用し、医療保健学部作業療法学科ならびにコンピュータサイエンス学部にて依頼を行った被験

者に総計 30 台を貸し出す形にてデータの収集を行った。図 1 2 に示す CCP-X-25 デバイスは、日常生活をモニタリングする上では十分であると考えられるサンプリング周波数 100Hz にて連続 16 時間のデータ記録が可能であり、内蔵しているバッテリーは約 90 分間にて充電を行うことができる。このため、起床後から就寝までの時間帯にて連日の計測が可能である。また、楽器演奏のような比較的激しい運動を計測対象とする場合には、サンプリング周波数としては 500Hz といった値が必要となるが、デバイスの低消費電力設計により連続 11 時間のデータ記録を行うことができる。さらには、デバイスの重量が若干増加するものの、バッテリー容量を増加させることで、連続 45 時間以上の記録に対応している。ここで、デバイスには高精度な万年時計 IC チップ（月差± 10 秒以内程度）を搭載しており、別途記録を行った時刻の情報を手がかりにして、運動内容のアノテーションを試みている。このデバイスの利用方法は、使用開始時に電源スイッチを押すのみであり、以後のデータ記録や電池消耗による電源遮断等は全て自動的に行われる。また、データ記録後はデバイスからマイクロ SD メモリカードを取り出し、Windows アプリケーションにてデータファイルに変換した後、ネットワークにてアノテーション情報を記録したログファイルとともにデータのアップロードを行う。

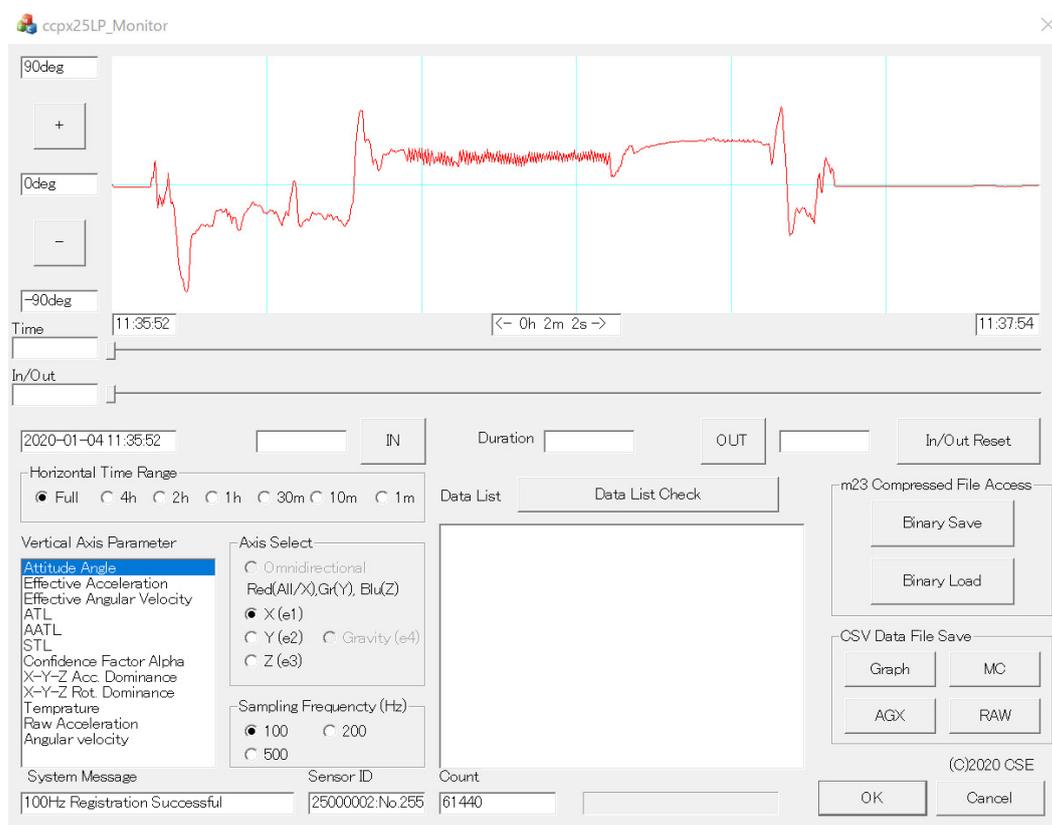
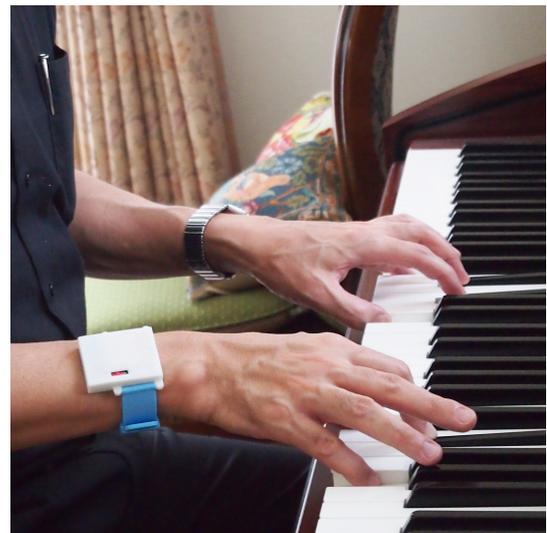


図 1 3 運動データ分析・管理用 Windows アプリケーション

図 1 3 は Windows アプリケーションのスクリーンショットであるが、モーションキャプチャー演算により、重力を基準とした水平面から利用者の前腕がなしていた角度を毎秒 100 回のスピードでプロットを行った例となっている。ここで、腕時計型運動解析デバイスを利き腕に装着した場合、キーボードのタイピングや食事といった、何らかの意図をもった動作に対し、前腕の姿勢角が水平に近づくことから、被験者の行動内容の概略を推定することができた。また、楽器演奏のような短時間内での周期的な繰り返し運動に対しては、運動のリズムを角速度信号から抽出することで、楽曲演奏を行っていた時間帯を比較的容易に特定できることが分かった。

4. プロジェクトのまとめと今後の展望

本共同研究プロジェクトでは3年間の研究期間において、当初の目標であった「いつでもどこでも気軽に利用できる医療 IoT 運動解析デバイス」を実現することができた。また、人間の身体運動に関わる幅広い分野からの応用アプリケーションの提案ならびに検討の結果、医療や日常生活に適用できる多くの有用な事例を見出している。プロジェクトにて研究開発を行った運動解析デバイスは、いつでもどこでも気軽に利用できるサイズならびに重量となっており、比較的安価（コンシューマー向けでは1台あたり数千円程度）にて製作できることから、多くの利用者によるデータの収集・蓄積と、その解析および情報サービスの進展が大いに期待できる。そこで今後は情報通信ネットワークを通じた大規模なモーションキャプチャーデバイス応用サービスの実現に向けて、研究開発を進めていきたいと考えている。



本プロジェクトによる成果の応用が考えられるアプリケーションの例

5. プロジェクトに関連する外部発表

[1] 手首装着型モーショントラッキング機器を用いた穿刺技術の定量的評価の試み、加納敬、上條史記、伊藤奈々、笠井亮佑、萩野稔、田仲浩平、篠原一彦、松下宗一郎、第26回日本コンピュータ外科学会大会、日本コンピュータ外科学会誌、Vol. 19, No. 4, p.352、(2017年10月、名古屋)

[2] 手首装着型運動センサによる内視鏡下鉗子操作評価～初学者のトレーニング過程観測による技量評価パラメータの検討～、菅野谷 知佳、松下 宗一郎、第26回日本コンピュータ外科学会大会、日本コンピュータ外科学会誌、Vol. 19, No. 4, pp.286-287、(2017年10月、名古屋)

[3] メタルギタリストのための高速ダウンピッキングトレーニングシステム、松下宗一郎、幸田有里、近藤百佳、溝上大輝、甲斐美月、情報処理学会インタラクティブセッション2018・インタラクティブデモセッション、2pages、(2018年3月、東京)

[4] モーショントラッキングを用いた血液回路内気泡除去の評価、上條史記、笠井亮佑、伊藤奈々、加納敬、萩野稔、田仲浩平、篠原一彦、松下宗一郎、第27回日本コンピュータ外科学会大会、日本コンピュータ外科学会誌、Vol. 20, No. 4, p.286、(2018年11月、奈良)

- [5] 手首装着型運動センサによる内視鏡下鉗子操作技量評価～手首傾斜角と回旋角による手術鉗子操作状況の可視化～、松下宗一郎、菅野谷知佳、出口智基、八木浩一、愛甲丞、瀬戸泰之、第 27 回日本コンピュータ外科学会大会、日本コンピュータ外科学会誌、Vol. 20, No. 4, pp.316-317, (2018 年 11 月、奈良)
- [6] ぴたっとキャプチャー 2 ～ひざ下へ取り付け角度を推定する慣性モーションセンサ～、松下宗一郎、情報処理学会インタラクシオン 2019・インタラクティブデモセッション、2pages、(2019 年 3 月、東京)
- [7] 手首装着型運動センサを用いたキーボードタイピング個人特徴の数値化、菅野谷知佳、松下宗一郎、情報処理学会インタラクシオン 2019・インタラクティブデモセッション、2pages、(2019 年 3 月、東京)
- [8] 摂食行動を分析するメガネ型モーションセンサデバイス、金島諒、原山直樹、鶴江大輝、荒木映美、西川未来、今村圭佑、吉田海、菅野谷知佳、松下宗一郎、情報処理学会インタラクシオン 2019・インタラクティブデモセッション、2pages、(2019 年 3 月、東京)
- [9] A Wrist-worn Motion Evaluation System for Fast and Powerful Down Picking of Heavy Metal Guitar, S.Matsushita, ACM Proceedings of International Symposium on Wearable Computers (ISWC '19), pp.145-149, 2019 (2019 年 9 月 London, U.K.)
- [10] Motion Sensing Eyewear for Daily Healthcare Monitoring, S.Matsushita, R.Kaneshima, IEEE Proceedings of 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2019), pp. 949-952, 2019 (2019 年 10 月、大阪)
- [11] Wrist-worn Motion Diagnosis Device for Heavy Metal Guitarists, S.Matsushita, IEEE Proceedings of 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE2019), pp.651-652, 2019 (2019 年 10 月、大阪)
- [12] 気管内吸引操作の定量的評価の試み-手首装着型 3 軸加速度センサの応用-、加納敬、島峰徹也、上條史記、伊藤奈々、笠井亮佑、萩野稔、日向奈恵、武田朴、田仲浩平、松下宗一郎、篠原一彦、第 28 回日本コンピュータ外科学会大会、日本コンピュータ外科学会誌(オンライン版)、Vol. 21, No. 4 p.259, (2019 年 11 月、東京)
- [13] 手首装着型運動センサによる内視鏡鉗子操作技量の定量推定、松下宗一郎、八木浩一、愛甲丞、瀬戸泰之、第 28 回日本コンピュータ外科学会大会、日本コンピュータ外科学会誌(オンライン版)、Vol. 21, No. 4, pp.256-257, (2019 年 11 月東京)
- [14] 体動を捉えるモーションセンサーによる腹腔鏡手術の上達度計測、松下宗一郎、八木浩一、愛甲丞、瀬戸泰之、医学書院、臨床外科、Vol.75、No.4、pp.495-499、雑誌 09323-04、ISSN 0386-9857、2020 年 4 月刊行

以上