



Title	看護学と工学・情報学における分野横断型共同研究の経験と今後の開発方針 : ESTE-SIMプロジェクト
Author(s)	コリー, 紀代; 小水内, 俊介; 金井, 理; 近野, 敦; 中村, 美鈴; 井上, 創造; 二宮, 伸治
Citation	日本ロボット学会誌, 41(4), 345-353 https://doi.org/10.7210/jrsj.41.345
Issue Date	2023-05
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/90663
Type	article
File Information	Colley2023.pdf



[Instructions for use](#)

解説

看護学と工学・情報学における分野横断型共同研究の経験と今後の開発方針：ESTE-SIMプロジェクト

Experience of Integrative Research among Nursing Science, Engineering, and Information Technology and Tactics for Global Standard

コリー 紀代^{*1} 小水内 俊介^{*2} 金井 理^{*3} 近野 敦^{*3}
中村 美鈴^{*4} 井上 創造^{*5} 二宮 伸治^{*6}^{*1}北海道大学大学院保健科学研究所 ^{*2}香川大学創造工学部 ^{*3}北海道大学院情報科学研究所 ^{*4}東京慈恵会医科大学 ^{*5}九州工業大学 ^{*6}広島国際大学
Noriyo Colley^{*1}, Shunsuke Komizunai^{*2}, Satoshi Kanai^{*3}, Atsushi Konno^{*3}, Misuzu Nakamura^{*4}, Sozo Inoue^{*5}
and Shinji Ninomiya^{*6}^{*1}Faculty of Health Sciences, Hokkaido University ^{*2}Kagawa University ^{*3}Faculty of Information Technology and Sciences, Hokkaido University
^{*4}The JIKEI University ^{*5}Kyushu Institute of Technology ^{*6}Hiroshima International University

1. 分野横断型共同研究の背景

2022年10月に始まった「PICU：小児集中治療室」という月9ドラマで扱われるような、医療アクセスの地域格差は、コロナ禍における医療格差の存在とその帰結を多くの人々に印象付けた。本ドラマでは、アメリカで小児救急を学んだ都市部の医師が地方都市にPICUを開設し、ドクターフライトシステムを作って医療の地域格差を解消しようとするドラマとなっている。

一方、木曜9時の「トラベルナース」では、アメリカでナースプラクティショナーという処方や診断、処置を実施できる免許を取得した看護師が、急性期病棟で窒息死寸前の患者の救命と法律の順守とのほごまで揺れ動く場面が描かれていた。

奇しくも同時期に開始した二つのドラマに共通して流れるテーマには、「医療資源の配分の地域格差」と「医療関係法規による制限」がある。この課題は今まで「地方における医師・看護師不足」が主な原因として次のような対策が講じられてきた。看護系大学の増設、外国人看護師の雇用促進、看護師の待遇改善による離職防止、在宅医療の促進（これは家族負担の増加や介護離職の一因ともなる）と医療施設の拠点化、IT技術の活用、看護・介護ロボットの開発、特定行為研修による看護師の裁量拡大などである。しかしながら、従前の性別役割分業や医師の独占業務との関連等により、ケア提供者不足に加えて低賃金という労働環境は

変わらず、性別役割分業・性別賃金格差の一因ともなっている。医療における多職種協働という国際的潮流からはますますかけ離れてしまっている現状がある。

医療の地域格差問題は、税負担と医療アクセスの不公平性を本質とする。都市部と地方では受けられる医療サービスが異なるにもかかわらず、公平な税負担が求められるという構造である。少子化がますます加速する北海道では、地方の産科医不足から地方の妊婦が札幌など都市部の病院で出産するためにホテル滞在する事例が増えてきている。在宅人工呼吸器装着児が十分な在宅医療サービスを見つけられず、看護師配置が進んでいる都市部の特別支援学校近辺に一家で移住する事例も散見される。地方における医療アクセスの改善策として、遠隔医療の普及が期待されているが、人命にかかわる緊急事態に遠隔医療でできることはほとんどない。根本的な解決策として、「超高齢化社会やコロナ禍のような変動する医療ニーズに柔軟に対応できる自律的な専門職（人間）が、地方にも予測的・計画的に配置されていること」と「労働としての医療サービスの効率化」という組織的リスクマネジメントが求められる。加えて、海外を手本にして学ぶだけでなく、若手看護師が海外で活躍し、帰国後に後輩指導できるような看護学における国際競争力強化策の構築も喫緊の課題である。

適正な医療資源配置に資するため、我々は8年ほど前より、気道管理をトレーニングできるダイナミック・プロジェクト・マッピング・シミュレータ（Endotracheal Suctioning Training Environment Simulator: ESTE-SIM）を共同開発してきた。本稿ではESTE-SIMの開発過程と看護学、工学、情報学という分野横断型共同研究についてご紹介する。

2. ESTE-SIMの命名

筆頭著者が北海道大学教育院博士後期課程在学中に、主指導教官であった宮崎隆志教授から「医療的ケア児の支援の一つとして、シミュレータを開発してはどうか」という助言をいただいた[1]。2013年春のことである。シミュレータ開発経験はまったくなく、これから工学を極めるには時間が足りないと思い、共同研究者を探すが見つかるわ

原稿受付 2023年2月22日

キーワード：Endotracheal Suctioning, Simulation Development, Nursing Education, Multidisciplinary Research, Health Equity

^{*1}〒060-0812 札幌市北区北12条西5丁目^{*2}〒761-0396 高松市林町2217-20^{*3}〒060-0813 札幌市北区北14条西9丁目^{*4}〒105-8461 港区西新橋3-25-8^{*5}〒804-0015 北九州市戸畑区仙水町1-1^{*6}〒739-2631 東広島市黒瀬学園台555-36^{*1}Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido^{*2}Takamatsu-shi, Kagawa^{*3}Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido^{*4}Minato-ku, Tokyo^{*5}Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka^{*6}Higashihiroshima-shi, Hiroshima

けもなく、近い研究テーマの研究者にメールで打診しては断られる日々が続いた。共同研究で開発したいシミュレータは人工呼吸器ケアシミュレータ、で決まっていた。新人看護師で集中治療室に配属され、体位変換で循環動態が急変する患者の看護を行うという高い緊張の中、入職後3か月で体重6 [kg] 減という身体的・精神的重労働を経験したためである。そのようなストレスの高いケアにもかかわらず、在宅では人工呼吸器装着児の保護者が24時間365日、メインのケア提供者となっていることが気がかりであった。北海道療育園の平本東園長（当時）のご協力の下、ご家族のQOLを調査させていただいたこともある[2]。

しかし、最初から複雑な思考過程を要する人工呼吸器ケアのシミュレータに取り掛かれるとも思えなかった。そのため、気道管理の一つである気管内吸引†シミュレータの開発を目指すこととした。北翔会札幌あゆみの園の清水弘美看護師、北海道大学科学技術コミュニケーター養成講座の同期であった大塚健氏のご協力を得て、気管内吸引の手順をさらに細かい工程に分解し、言語化し、熟練看護師が行う観察の項目や意思決定分岐を含んだアクティビティ図[3]、オントロジー[4]を作成した。行為の分節化・言語化の過程においては、国際看護協会（International Council of Nurses: ICN）が2005年に作成した専門用語集である International Classification for Nursing Practice (ICNP) version1.0を参考とした[5]。動作を細分化した過程で、「蒸留水を吸引しカテーテルの内腔を洗浄する」等の単体では看護行為とはいえない動作が出現したことから、「限定された技術を提供できることが『看護』ではなく、ある目的を持った行為の全体が『看護』を形成する」と考えられた[5]。以上の結果を用い、女性研究者支援室の支援により、技術補助員として高橋望氏の協力を得て、熟練看護師10数名が実施する気管内吸引の各工程の所要時間の算出データに基づいた、生身の人間が実施可能な速度でのフルCG動画教材を作成した。これには、様々な角度から見たい箇所を何度も繰り返し視聴可能というメリットもあったが、肝心の気管内吸引カテーテル操作について、触覚を通じた学習ができないという課題もあった。また、新規性の高いシミュ

†気管内吸引とは、長期人工呼吸器装着の際、気管カニューレとよばれる管を手術により気管内に留置し人工呼吸器と接続するが、唾液や喀痰などの貯留による換気不足を防ぐため、カテーテルとよばれる細い管を気管カニューレから挿入し、陰圧で貯留物を吸引、除去する技術である。気管壁には迷走神経や腕頭動脈が隣接しており、カテーテル操作により咳嗽反射、嘔吐反射の誘発というマイナートラブルのほか、徐脈や血圧低下、腕頭動脈損傷による出血などの致死的风险が伴う技術である。気管カニューレにはカフ付きとカフなしがあり、カフに空気を注入し気管壁とカニューレを固定するほか、カフ上部で誤嚥した唾液の気道への落下を防ぐ構造となっている。小児では気道が細いため、カフなしカニューレが選択されることが多い。気管カニューレのサイズや湾曲と気管壁のフィッティングも気管内吸引のリスクに直結する。そのため、適切な気管カニューレを選択し、気管内吸引を安全に実施できるスキルを持つことのほか、気管内吸引自体の回数を減らす呼吸訓練、咳嗽訓練、嚥下訓練、口腔ケアなどの感染予防、体位変換による排痰、食事・水分形態の選択、食事中の姿勢保持、室内の換気、加温・加湿、離床支援などの看護技術が重要である。また、気管内吸引は昼夜を問わず必要とされるため、在宅ケア提供者の慢性的睡眠不足、特別支援学校における看護師不足による医療的ケア児の受け入れ困難が問題となっている。

レータとするため、札幌雪祭りで毎年見ていたプロジェクションマッピングを応用できないかと考えていた。さらに、既存の人工呼吸器シミュレータについて調べるほどに、国内の人工呼吸器の9割以上を輸入に頼っていることが分かった（これは、医療費増が国民税の海外流出を意味する）。

そのようななか、医工学治療学会で広島国際大学教授、二宮伸治先生のご講演タイトル「人工臓器をめぐるシミュレーション 体外循環教育用シミュレーションシステムの現状と日本発標準型仮想患者シミュレーションモデルの提案」を学術大会抄録集で拝見し、直接ご相談することを決意して学会参加に臨んだ。ご講演後に大ステージの階段から降りる二宮先生のもとに駆け寄り、気管内吸引シミュレータとして気道粘膜モデルの作成をお願いできないかとご相談した。唐突なお願ひではあったが名刺交換をさせていただき、約半年後にご協力いただけるというメールをいただいたときの喜びは忘れようもない。今でも二宮先生は、「あのときは変な先生が来たなあと思った」と仰ることがある。

二宮先生のご指導の下、2016年のIMSHという世界最大のヘルスケア関連シミュレーション学会において、吸引カテーテル操作時の感触と粘膜損傷を再現する「粘膜付き気道モデル」をポスター発表させていただいた[6]。「粘膜付き気道モデル」は続くESTE-SIMの共同開発の人脈形成の鍵ともなる。

というのも、当時、北海道大学で学内研究者の学際的共同研究の加速のため、医療×工学研究者マッチングの取り組みを実施しており、そこで偶然お会いした情報科学研究院の金井理先生（デジタル幾何学）、近野敦先生（ロボット工学）と名刺交換をさせていただいていた。実際にシミュレータ開発のお願いにお伺いする際に、二宮先生の「粘膜付き気道モデル」を持参したところ、吸引カテーテル操作の巧拙によりCG患者の表情が変化するプロジェクションマッピングシミュレータの共同開発についてご快諾いただき、近野研究室所属の小水内俊介先生もご協力いただけることとなった。特に、小水内先生は各大学で開発されたシミュレータの機能を統合する中心的な役割を果たして下さっている（後述のESTE-SIMの技術的な側面は小水内先生が執筆くださった）。2017年に採択された基盤研究（B）「即時判断力と巧緻性を向上する3D映像投影シミュレータの開発」を財源に、ESTE-SIMプロジェクトが始動した。プロジェクト名ESTE-SIM: Endotracheal Suctioning Training Environment Simulatorは二宮先生に命名いただいた。

一方で、看護学の専門家として自分の役割を探し、シミュレータに搭載する気管内吸引技術が最先端、かつ国際レベルであることの確認が必須と考え、看護系の国際学会への参加や文献レビューにより研究動向の把握に努めた。その際、2014年にフィンランドで開催されたICN（国際看護協会）Nurse Practitioner/Advanced Practice Nurse Network Conferenceで、東京慈恵医大教授の中村美鈴先生に偶然お会いした。中村先生は、ナースプラクティショナーという日本で国家資格化が目指されている資格制度に関するご研

究をなさっていた。2016年の香港大会、2018年のオランダ大会でもお会いし、2018年より、ESTE-SIM プロジェクトにご協力いただいている。2022年のアイルランド大会において、NP/APN Network Conference 2026の開催国募集があり、2022年11月に中村先生を大会長に誘致委員会が設置された。2026年大会までにESTE-SIMを実用化し、国際的にアピールできればと考えている。

また、人工呼吸器ケアに関連し、三学会合同呼吸療法認定士資格の取得などヘルスケア専門知識のアップデートのほか、2009年頃より動作解析、視線計測法を業者の方々からご指導いただきながら、気管内吸引技術の熟練度の数値化や客観的な技術評価尺度の開発に着手していた。Vtuberハッカソンに参加した際の参加者とチームを組み、北海道地区優勝、その後全国大会に出場し、Perception Neuron賞をチームで受賞した。北海道オープンソースハッカソンにも参加し、その際のチームでも優勝し、NoMapsで発表した。2021年には北海道大学大学院医学研究院医療AI開発者養成プログラム（CLAP）を受講し、自らの無関心により共同研究の先生方にご負担がかからないようAIに関する知識の習得に努め、医療と工学という領域を横断してのコーディネートに努めた。そのような経験も、ESTE-SIMとして「センサ付き気道モデル」と「プロジェクションマッピング技術による生体反応提示」が統合された際の教育効果評価尺度開発に有効であった。近野先生、小水内先生のVRゴーグルやアイトラッキング、モーションキャプチャに関する知見、実現可能性に関するアドバイスからシミュレータ開発の方針が決定でき、実際に体験させていただいたことで、XRシミュレータにおける学習に効果的な「仮想と現実の比率」の検討ができたことと感謝している。

プロジェクションマッピングを用いた生体反応に関しては、金井先生が患者マネキンの苦痛表情、顔色不良を再現する機能を実装してくださった。学習者が、カテーテル操作の巧拙を患者の表情と顔色変化により認識できる仕組みとなっている。外国人男性アバターに「おじさんモデル」と命名いただいたことで、親近感がわき、コミュニケーションが円滑になったと思う。Action Unitという顔の各パーツに配置された標識により表情筋の動きが再現され、疼痛時のフェイススケールのように痛みの程度に合わせて筋肉の動きと程度を呈示する[7]。これにより、新人看護師が病床で実際に経験する方法により、実施した技術の巧緻のフィードバックが可能となった。

熟練看護師と看護学生を対象に測定した視線と動作データも、教育評価の自動化に向け、データを蓄積できないかと考えていた。そこで、人工知能学会で医療系の研究動向を確認する目的で、JSAI2016第30回人工知能学会に参加したところ、懇親会で九州工業大学准教授（現教授）の井上創造先生とお会いした。第二次ベビーブーマーと少子化問題、予測される看護サービス不足について熱く語っていただいたことを記憶している。井上先生も2018年よりESTE-SIMプロジェクトにご参画くださっている。

ESTE-SIMプロジェクトは、このように奇跡のような偶

然の出会いの積み重ねでできている。実のところは、ごく稀ではあるが分野の異なる共同研究の先生方と議論が白熱することもあった。しかし、言いたいことを隠してプロジェクトを進め、のちにシミュレータの機能に致命的な不具合が生じることを考えると、今は、白熱した議論ができる信頼関係があるESTE-SIMプロジェクトに参加できていることを最もありがたいと感じている。今後の研究のアイデアに直結するためご紹介は差し控えさせていただくが、ほかにも多くの先生方のご協力を得て活動をさせていただいている。この場を借りてお礼申し上げたい。

3. 気管内吸引訓練環境シミュレータ：ESTE-SIM

3.1 概要

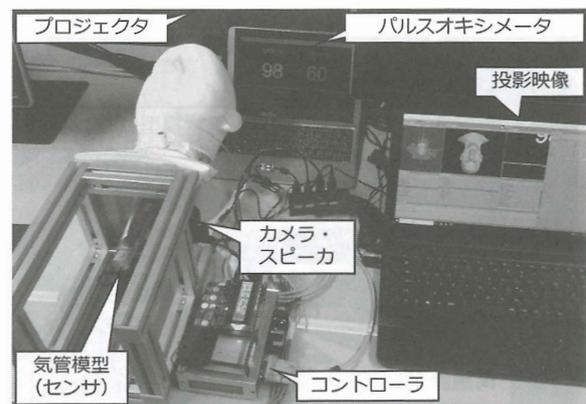
ここでは、気管内吸引手技に対して対話的な生体反応を再現可能なシミュレータESTE-SIMについて述べる。本システムは、内部に搭載された各種センサにより、看護技術の進行や医療機器の動きを計測し、その計測情報に基づき、3DCGモデルの表情やデジタル波形としての音声などで模擬生体反応を再現する。さらに、手技に対してどのような生体反応を呈すべきかという対応関係を記述する数理モデルを構築した。

3.2 気管内吸引に伴う生体反応の再現

図1(a)にパートタスクトレーニングに用いられてきた



(a) パートタスクシミュレータ



(b) ESTE-SIM の概観

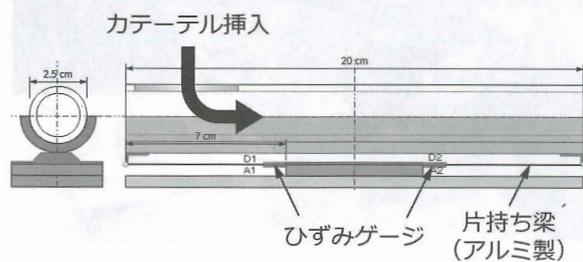
図1 パートタスクシミュレータ (a) と本研究で開発したシステム (b)

看護教育シミュレータ（京都科学）を示す。能動的な動きはないマネキンである。より高次のトレーニング環境を構築するため、図1(b)に示すESTE-SIMには、手技に応じた気管内吸引時に生じる生体反応を変化させる仕組みを実現した。

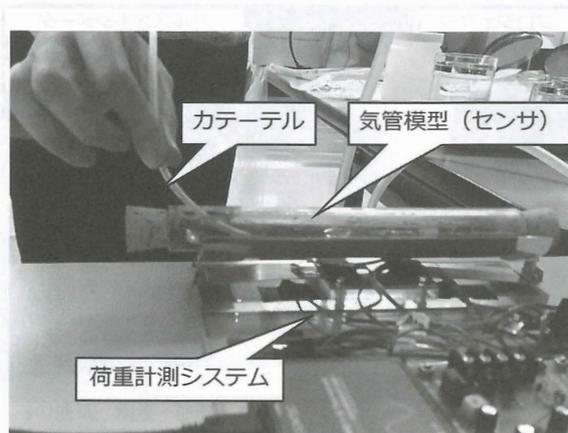
ESTE-SIMの概観は仰向け状態の上半身マネキンである。胴体内部には、気管内の模擬痰重量とカテーテル先端の挿入深度・接触力を計測可能なセンサ機能付き気管模型が設置されている。気管上部には人工鼻（カニューレ開口部用のフィルタ）や人工呼吸器と接続するチューブ（気管カニューレ）が設置され、気管模型はこのカニューレに接続するように設置される。胴体内部にはスピーカやカメラなども設置され、咳嗽音の再生やカテーテル操作の監視も可能となっている。頭部上方にはプロジェクタが固定され、プロジェクションマッピング技術を応用してマネキンの表情（目や口の動き、顔色の変化など）を動的に変化させることができる。生体反応として、手技開始からの経過時間に応じて顔色、SpO₂/HRの変化、および規定時間経過時の咳嗽反射（音のみ）の提示が可能である。さらに、計測された吸引カテーテル操作と表示すべき生体反応の対応関係を数理的に決定するモデルを構築した。以降、これらの各機能について詳述する。すべての機能は外部接続されたPCで処理される。

3.3 計測機能を備えた気管模型

ESTE-SIMの胴体内部には図2に示すような計測機能を備えた気管模型[8]が設置されている。気管模型の内壁は気道粘膜を模擬した柔らかい素材で覆われているため、カテーテル挿入時の現実的な抵抗感を再現できる。この柔ら



(a) 構造と寸法



(b) システム全体の概観

図2 開発した気管模型と計測システム

かい素材はある程度形状を設定して制作できるため、壁面が肥厚した気管狭窄のような状況を再現できる。気管模型は使用時に模擬痰を補充・交換するため、胴体からの着脱が容易にできる。

図2(a)に示すように、気管模型の両端は基部にひずみセンサが取り付けられた一对の片持ち梁で構成される力センサで支持され、胴体フレーム上に固定されている。気管模型の両端で計測される鉛直力に基づいて、気管内におけるカテーテル先端の接触位置と接触力を同時に推定することができる。原理的に、カテーテルが先端以外の部位でも気管に接触している場合、接触位置の推定は正確にはできない。しかし、模擬痰が入っている気道模型内におけるカテーテル（図2(b)）の接触位置と接触力をデジタル的に取得できる簡便な方法であり、参考情報として十分に重要である。

なお、気管模型とは別に、気管カニューレにも人工鼻の脱着を検出するセンサが装備されている。これは、素子としてはタクトスイッチであり、人工鼻装着時には押下され、除去時に開放されることで、人工鼻の装着状態をデジタル的に取得することができる。

3.4 プロジェクションマッピングによる動的な表情変化

動的な表情の変化を再現するため、表情の映像をマネキンの顔面へプロジェクションマッピングする。投影対象となるマネキンの顔面形状（以降、顔面模型）と映像生成のために用いる3DCGモデル（以降、頭部CG）は同一のものを用いる。顔面模型および頭部CGの形状データは、既存のマネキンや人物の頭部を3Dスキャンしたデータや、一般に配布されているデジタルコンテンツを入手することで用意できる。図3では、頭部CGにTURBOSQUIDで販売されている21 Realistic Male Expressionsのデータを用い、顔面模型は3Dプリントにより作成した。

目と口の動きは、頭部CGにおける可動箇所のノード座標を直接編集することでモーフィングパターンを用意した。顔色は、CG中にわずかに大きく透明な頭部CGを重複配置し、そのテクスチャを青や赤に設定し、透明度を徐々に

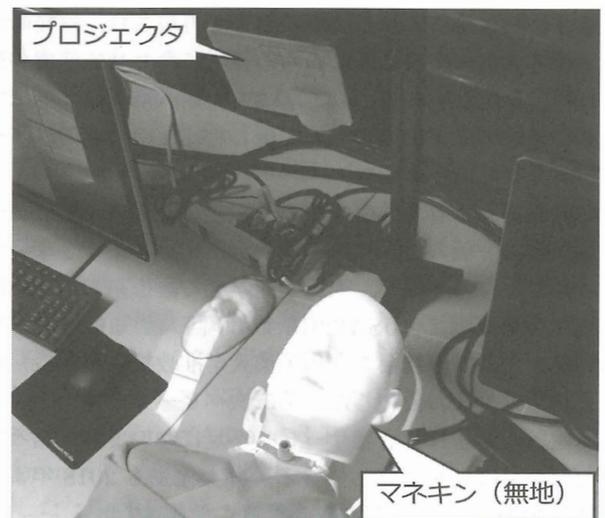


図3 プロジェクションマッピング部分の概観



図4 おじさんモデルの表情変化



図5 典型的なパルスオキシメータの表示の模擬

変化させることで再現した。これらの操作量はすべて0~1の間で変化するように正規化されている。

図4に、開眼し顔色が紅潮した状態から、閉眼し血の気が青白い状態(チアノーゼ)までの変化を示す。顔面模型は京都科学様に試作品を作成いただき、投影したところ白色が最も自然に再現できた。顔面模型は瞼の開閉ができないものの、頭部CGの変化だけで十分現実的に目を瞑った様子が再現されている。同図中では口は動いていないが、目と同様に開閉可能である。ただし、顔面模型は開口しており、目ほどには閉じた様子を再現できないため、今後の課題である。

3.5 バイタルモニタ

人工呼吸器装着児(者)の SpO_2/HR は、指先や耳朶などに装着されたパルスオキシメータにより常時モニタリングされており、看護師が最も注意を払う生体反応の一つである。したがって、看護教育シミュレータにおいてパルスオキシメータを再現することは重要である。

ESTE-SIMでは、市販されている典型的な表示項目に倣い、図5に示すような表示を再現した。現在の SpO_2/HR の数値を大きく表示するとともに、下部に SpO_2 の変動をグラフ表示している。この表示は、ESTE-SIM使用時に制御用PCに接続されたいずれかのモニタに全画面表示される。また、脈拍の同期音が再生され、音の高低は SpO_2 の値に応じて変動し、周囲の医療職者の判断指標となっているほか、各測定値がアラーム鳴動の設定値を下回った場合にはアラームが鳴動する。ここで表示される SpO_2/HR の数値は、後述する生体反応モデルによって生成される。

4. 生体反応モデル

4.1 生体反応のモデル化の必要性

定量的に計測可能な生体反応として、看護師が最も注意を払う指標の一つである SpO_2/HR に着目し、気管内吸引時の実測データの分析に基づき数理モデルの定式化を試みる。吸引時の生体反応(SpO_2/HR の変化)は同一患者でも計測ごとに著しく異なり、変化の傾向(上昇/低下)や変化自体の有無といったレベルで再現性が乏しい。しかし、ESTE-SIMにおける生体反応提示のため、大局的な特徴のある程度再現可能なモデルが必要となる。

4.2 吸引時の生体反応の計測

協力施設で運用されているパルスオキシメータN-600xAMS(コヴィディエン社製)を用いる。後処理を経て1[Hz]で更新されるデータを、メーカーのサポートを得て機器の内蔵ストレージから回収する。吸引開始・終了時刻を知るため、吸引圧の変化に基づいてイベントを記録する装置CISDRA-1[9:二宮研究室制作]を吸引機の配管経路に接続した。あらかじめN-600xAMSとCISDRA-1の時計を合わせ、CISDRA-1のログデータに記された時刻から吸引開始・終了時刻を知る。吸引開始時刻を0[s]として-10[s]から+190[s]までの200[s]間抽出され分析の対象区間となる。

協力施設長の承諾のもと、長期入所中で気管内吸引を必要としパルスオキシメータを常時使用している20~50代の男性4名から、日中8時間の実測データの提供と日中のイベント記録および独自機装着の了承を得た。実施にあたり北海道大学大学院保健科学研究院倫理審査委員会の承認(17-81-1)を得た。

4.3 生体反応の特徴抽出と定式化

リアルデータに基づいた考察[10]によれば、 SpO_2 は正常変動のみで基本的に大きくは変化しないものの、稀に吸引開始35[s]後に15[s]間で一次遅滞的に10%低下し、最低値から7[s]間で線形に回復する場合がある。一方、HRは吸引開始後5[s]間で平均21.0%線形に上昇し、吸引終了後15[s]間で一次遅滞的に回復する傾向がある。このモデルを定式化すると次のように表すことができる。

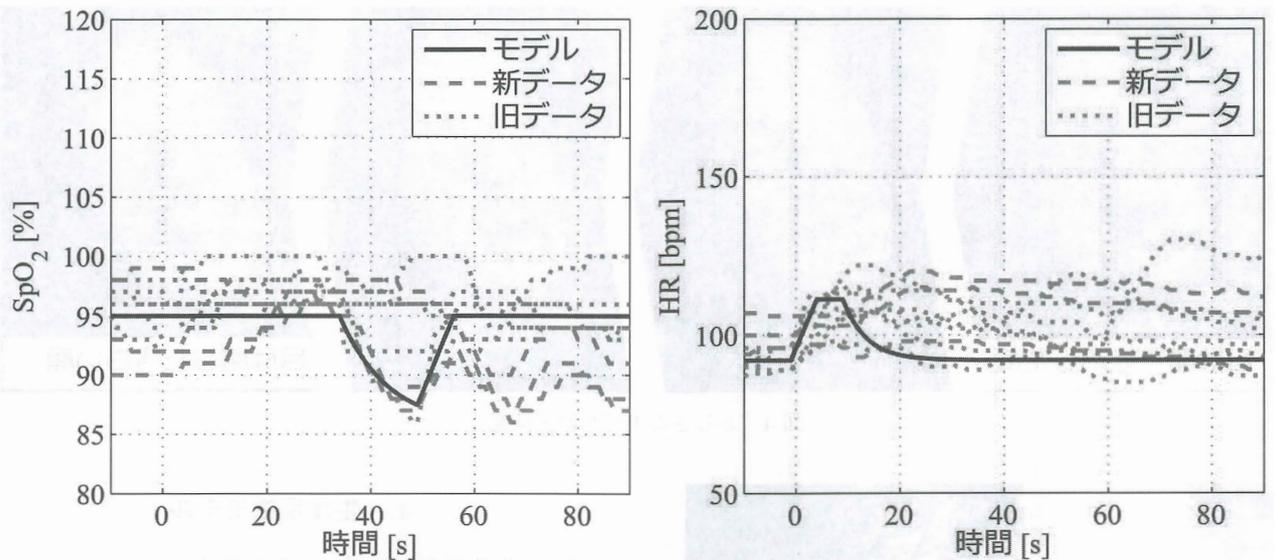


図6 生体反応モデルの模擬 ($x_{ini} = 95$, $y_{ini} = 92$, $T_{SpO_2} = 10$, $T_{HR} = 5$)

表1 生体反応モデルの変数と値

x_{ini}	y_{ini}	T_{SpO_2}	T_{HR}
95	92	10	5

$$x_i = \begin{cases} x_{ini} & (i \leq 35) \\ x_{i-1} - \frac{x_{i-1} - 0.9x_{ini}}{T_{SpO_2}} & (35 < i < 50) \\ x_{50} + \frac{x_{ini} - x_{50}}{7}t & (50 < i \leq 57) \\ x_{ini} & (\text{Otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

$$y_i = \begin{cases} y_{ini} & (i \leq 0) \\ y_0 + \frac{0.21y_{ini}}{5}i & (0 < i \leq 5) \\ y_5 & (5 < i \leq 10) \\ y_{i-1} - \frac{y_{i-1} - y_{ini}}{T_{HR}} & (10 < i \leq 35) \\ y_{ini} & (\text{Otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 i はデータ番号 (1 [Hz] の場合には時刻に相当)、 x_i , y_i はそれぞれ SpO_2/HR , x_{ini} , y_{ini} はそれらの初期値、 T_{SpO_2} , T_{HR} はそれぞれ SpO_2/HR の一次遅れ近似の時定数である。

図6に本モデルによる SpO_2/HR の変化、本研究における実測データ (新データ) および先行研究 [11] における実測データ (有効なデータのうち1名7計測分、旧データ) を示す。表1に本モデルに含まれるパラメータの値を示す。これらの値はヒューリスティックに設定した。互いに著しく異なるデータ全体に対する本モデルの一致性は期待できないものの、 SpO_2 の稀な低下や HR の上昇といった特徴的な挙動はおおむね模擬されている。ESTE-SIM への実装においては、人工鼻の取り外しを検出して本モデルを単に発火させるだけでなく、カテーテルの挿入深度や接触力に応じて定常変動成分を加えたり、初期値を現実的な範囲でランダムに設定したりすることで、模擬性の向上が期待

できる。

4.4 そのほかの生体反応

構築した生体反応モデルは直接的には SpO_2/HR の変化を制御するが、 SpO_2 に比例して顔色 (チアノーゼ) を再現する青のテクスチャの透明度も変化する。また、 SpO_2/HR の値によってパルスオキシメータの表示および同期音・アラートが決定される。

これらとは別の生体反応として、咳嗽音と瞬目が設定された。通常、気管内吸引中は呼吸ができなくなるため10[s]程度で実施されることから、人工鼻を取り外し10[s]経過後に再生される咳嗽音アラートとした。また、不定期に瞼を開閉することで、ESTE-SIM の臨場感の向上を図った。さらに、ここに挙げたすべての生体反応は、多チャンネルのアナログスライダのような外部入力装置によってその挙動に介入し、自由に変更することが可能である。これにより、指導者の外部入力によってシナリオに突発事態を発生させる運用上の自由度がある。

5. ESTE-SIM の機能の統合動作実験

ESTE-SIM が備える各機能の統合的な挙動を確認するため、標準的な気管内吸引手技によるユーザテストを行った。研究協力の同意が得られた熟練看護師9名および看護学生が、従来のパートタスクトレーニングと同様にESTE-SIMを使用し、次の手順で気管内吸引を実施した。吸引実施の判断、カテーテルの準備、人工鼻の取り外し、カテーテルの挿入・抜去、人工鼻の取り付け、カテーテルの片づけ、実施後の評価である。気管模型内には模擬痰を注入して現実的な吸痰感を再現した。ESTE-SIM は手技の所要時間、カテーテル先端の挿入深度と接触力、 SpO_2/HR の値を記録する。人工鼻が取り外されて以降は、 SpO_2/HR と顔色の変化、咳嗽音、パルスオキシメータの表示と電子音を再現する。

図7に、初心者と熟練者のカテーテル挿入深度・接触力および生体反応モデルの挙動の一例を示す。塗りつぶしの

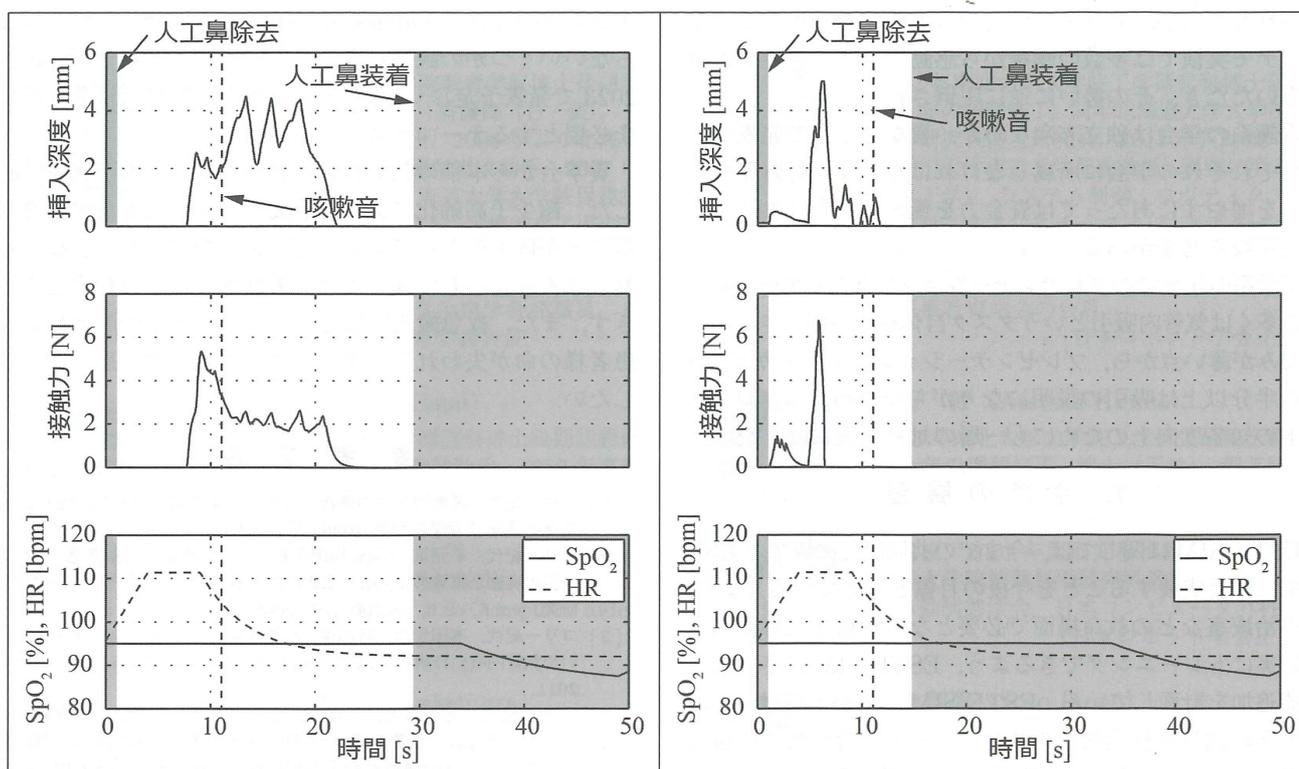


図7 ある看護学生と看護師の吸引結果

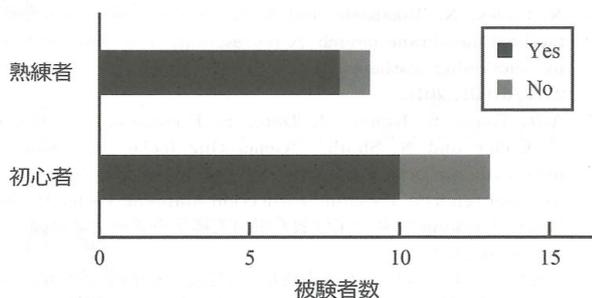


図8 看護学生と看護師の表情変化の認識の違い

ない部分が人工鼻を取り外してから再装着するまでの処置期間であり、人工鼻を取り外した時刻を1[s]に統一した。咳嗽音再生が初心者は吸引開始付近であるのに対して、熟練者は処置終了付近となっていることから、初学者は人工鼻の取り外し後にカテーテルの準備に時間を要していることが明らかとなった。カテーテルの最大挿入深度や最大接触力に顕著な違いは見られないが、処置時間には初心者と熟練者の違いが見られた。SpO₂ および顔色は人工鼻の取り外しから35[s]後に変化し、処置時間が長い初心者は片付けに移行するタイミングでその変化に直面するが、ほとんどの場合その様子を静観した。一方、処置時間の短い熟練者は、多くの場合変化が生じる前に処置が終了しており、変化に直面すると声掛けや再吸引の準備をするなどの対応を見せた。

図8に、表情変化の認識に関するヒアリング結果を示す。初心者、熟練者の多くが表情変化を認識できていたことが分かる。一方、照明下のプロジェクションマッピングが見えにくい、日本人と異なる顔立ちの変化が分かりにくい、と

いったコメントが得られた。

以上のことから、ESTE-SIMは気管内吸引の習熟度を定量的に評価し、技術の巧拙に合わせた生体反応を再現できることが確認できた。

6. 分野横断型共同研究の難しさとやりがい：工学系の立場から

開発の観点では、研究分担者や開発要素の数が少なくないプロジェクトであり、この点は共同研究の難しさにつながりがちな要素ではあるものの、定期的なミーティングや随時のテーブルイクなどでの細やかなコミュニケーションが功を奏してか、工学系の立場（のうちの一人）としては、至極活動しやすかったと考える。

年度末に実施されることが多かった大々的なユーザテストに向けて、十分な準備時間と財源が確保でき、着実に開発を進めることができた。また、他の研究分担者が担当する開発要素との連携仕様はあらかじめ打ち合わせのなかで簡潔に設定されており、いざ統合という段階においておおむね円滑に実装作業が進み実験に使用することができた。このような観点から、開発タスクはおおむねストレスフリーだったと言える。

従来の看護教材の課題解決を目指した看護教育システムの開発にあたっては、論文化・特許化にあたってのアピール方針が難しかった。この点は、多数のユーザテストを実施できたことから、開発より運用に重きを置くことで説得力のある実績となったと考える。

対外発表の観点では、工学系の学会で発表やデモ実演をしたら技術的な新規性や洗練の余地の指摘が降ってくるで

あろうところが、看護系の学会や看護関係者の集会での発表やデモ実演では多数の聴衆から感動の表明と普及への期待をいただき、その勢いに逆に圧倒された。

看護系の学会は独立志向なのか、異なる学会で発表するにはそれぞれの学会に所属しなければならず、対外発表の機会を増やすにあたっては資金力を備えるか主に参加する学会を絞る必要がある。

工学系の学会でのプレゼンテーションにあたっては、参加者の多くは気管内吸引というタスク自体やその困難さなどに馴染みが薄い点から、プレゼンテーションやディスカッションの半分以上は吸引の説明になりがちなため、本プロジェクトの知名度向上のためにも一層の対外発表に励みたい。

7. 今後の展望

ESTE-SIMに関しては、今までの共同研究の成果として、確実に社会実装することを今後の目標と考えている。また、集中治療室などの救命場面で必要となる技術を教育機関内で確実にトレーニングできるよう、ESTE-SIMにさらなる機能追加を計画している。ESTE-SIMの最終形態は、看護系大学の教員が社会的ヘルスケアニードに合わせて教材を開発し、実際に学生に対し教育し、その教育効果によって教材を改良するという循環システムである。コロナ禍の影響で国際的にもシミュレータの需要が高まっているため、開発を急ぐ必要がある。

2022年の日本医工学治療学会に参加した際、他大学の臨床工学技士の先生からISOについてアドバイスいただいたが、手が付けられていない。視線・動作データなど各種センサーで取得したデータの記載方法の統一化も課題と思われる。さらに、シミュレータの普及には、自動車の国際免許のような国際看護師免許システムの構築も必要と考えている。海外ですでに実施されているテキスト教材の標準化とナンバリングは国内の看護系学会で取りまとめが開始されているが、ESTE-SIMなどのXRシミュレータを大学間で共有するシステム構築に関しては、工学・情報学系研究者の支援と大きな額の開発助成が必要と思われる。VRシミュレータに関しては、科研費など税金を財源とする研究費を用い、国内の複数の大学で熾烈な開発競争が繰り返されている。似たような病室のCGが作られており、見た目が異なるため互換性がないという課題がある。

また近年、超少子高齢化対策として、看護の自動化に向けた分野横断的共同研究も必要と考えている。数年前より北大保健科学研究所図書室の河野由香里氏、根本萌氏のご協力により、気管内吸引の自動化に関するシステムティックレビューを行い、気管内吸引自動化の先行研究には、気管カニューレカフ上部の持続吸引(subglottic suctioning)、体位ドレナージのための自動体位変換システム(continuous lateral rotational therapy)、人工呼吸器のオプションとしての自動気管内吸引機能(Automatic Secretion Clearance Function)、カフマシ(artificial cough maneuver)、人工呼吸器装着中の咳嗽と呼吸の識別(automatic identification of breath and cough)、気管内吸引後の気道クリ

アランスの評価(changes of airflow)など越えなければならぬいくつかの課題があることが明らかとなった(ICN 2023で発表予定)。こちらでも大規模な分野横断型共同研究を必要とするテーマと考える。

貴学会から本稿の執筆依頼が届いた際は、大変光栄に感じた。超少子高齢化により、看護師不足はますます加速することが現実視されている。どのような健康レベルにあるお子さんも安心して通学でき、看護師が仕事を抱え込みすぎず、また、救急搬送困難というシステム上の問題により患者様の命が失われないようにするため、お知恵をお借りしたい。

参考文献

- [1] コリー紀代：医療的ケアの構造と課題に関する実証的研究，博士論文，北海道大学教育学院甲第 10961 号，2013。
- [2] コリー紀代，平元東：“気管切開を有する在宅重症心身障害児（者）の吸引の実態と家族の QOL～家族に対する援助の方向性～”，小児保健研究，vol.6, no.6, pp.700-707, 2009。
- [3] コリー紀代，本田千穂，阿部保，小笠原克彦：“アクティビティ図を用いた気管内吸引技術の可視化”，医工学治療，vol.23, no.1, pp.22-34, 2011。
- [4] コリー紀代，清水弘美，高橋望，小水内俊介，近野敦，金井理，二宮伸治，大塚健，浅賀忠義：“熟練看護師の視線計測による気管内吸引オントロジーの構築と今後の可能性”，医学教育，vol.49, no.2, pp.112-125, 2018。
- [5] 伊藤紀代：“気管吸引動作の言語化：ICNP version1.0 との比較”，平成 20 年度第 26 回看護研究発表会抄録集，pp.13-15, 2009。
- [6] N. Colley, N. Takahashi and S. Ninomiya: “A prototype of tracheal membrane model: A representation of sense of touch by suctioning catheter,” IMSSH2016, <http://hdl.handle.net/2115/61901>, 2016.
- [7] A.R. Fauzi, S. Kanai, H. Date, S. Komizunai, A. Konno, N. Colley and N. Shinji: “Generating facial expressions of pain with projection mapping for the nurse training simulator (2nd report)– Dynamic Projection Mapping Using Marker-based Tracking,” 精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集，pp.59-60, 2019。
- [8] 二宮伸治，コリー紀代，小水内俊介，近野敦，金井理，高橋望，浅賀忠義：“痰吸引トレーニングシミュレータのための痰吸引量およびカテーテル接触荷重リアルタイム計測装置の開発”，第 5 回日本シミュレーション医療教育学会学術大会抄録集，A-12, 2017。
- [9] コリー紀代，近野敦，小水内俊介，二宮伸治：“小児を対象とした安全な気管内吸引方法の確立に向けて—動圧吸引法と静圧吸引法の比較—”，北海道小児保健研究会会誌，pp.12-26, 2018。
- [10] コリー紀代，小水内俊介，村田恵理，稲村道子，玉置美香，八柳千佳子，山田真代，近野敦，金井理，浅賀忠義，井上創造，萬井大規，高橋望，二宮伸治：“生体反応を呈するシミュレータ ESTE-SIM のための吸引時 SpO₂/脈拍数の実測に基づく数値モデル定式化の試み”，第 40 回日本呼吸療法医学会学術集会抄録集，O10-3, 2018。
- [11] 小水内俊介，コリー紀代，二宮伸治，近野敦：“生体反応を呈する喀痰吸引シミュレータ ESTE-SIM のための生体反応モデル（酸素飽和度および心拍数）”，第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集，1B6-08, 2018。



コリー紀代 (Noriyo Colley)

2013年北海道大学大学院教育学院博士後期課程修了。博士(教育学)。看護師(日・豪)、三学会合同呼吸療法認定士。2006年より北海道大学医学部保健学科看護学専攻助手。2007年より同助教, 2008年北海道大学大学院保健科学研究院助教, 現在に至る。医療的ケア児の支援充足を目的としてシミュレータ開発に従事する。2018年よりICN NP/APN Network Core Steering Group Member。日本看護科学学会英文誌編集委員, 日本医工学治療学会評議員, 日本医学教育学会推薦代議員, 日本社会教育学会会員。



小水内俊介 (Shunsuke Komizunai)

2012年東北大学大学院工学研究科博士課程後期3年の課程修了。同年北海道大学大学院情報科学研究科博士研究員。2013年同助教。2023年香川大学創造工学部准教授, 現在に至る。博士(工学)。システム制御, ロボティクス, メカトロニクス, ヒューマン・コンピュータ・インタラクション, 看護教育システム, 看護自動化システムなどに関する研究に従事。日本機械学会, 日本VR学会, IEEE, 日本シミュレーション医療教育学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)



金井 理 (Satoshi Kanai)

1987年北海道大学工学研究科博士後期課程修了。同年北海道大学工学部助手, 1989年東京工業大学工学部助教授, 1995年北海道大学工学部助教授, 2007年北海道大学情報科学研究科教授, 現在に至る。工学博士。三次元デジタル幾何処理工学の研究に従事。精密工学会, 日本写真測量学会, IEEE 会員。2022年より Computer aided design and applications 誌 Associate Editor。



近野 敦 (Atsushi Konno)

1993年東北大学大学院工学研究科博士課程後期3年の課程修了。博士(工学)。同年同大学工学部助手。1995年東京大学大学院工学系研究科助手。1998年東北大学大学院工学研究科助教授, 2007年同研究科准教授, 2012年北海道大学院情報科学研究科教授, 現在に至る。日本機械学会, 計測自動制御学会, 日本コンピュータ外科学会, IEEE 等の会員。

(日本ロボット学会正会員)



中村美鈴 (Misuzu Nakamura)

大阪大学大学院医学系研究科保健衛生学専攻, 博士(看護学)。看護師免許取得, 臨床工学技士免許取得。東京医科歯科大学医学部付属病院等での臨床看護師の経験を得て, 教育研究職へ転職。聖母女子短期大学, 杏林大学, 2005年自治医科大学/大学院教授, 2018年4月より現職, 現在に至る。専門分野はクリティカルケア看護学/周手術期看護学/救急看護学。日本救急看護学会理事, 日本ルーラルナース学会理事, 日本クリティカルケア看護学会評議員, ICN NP/APN Network Communication Sub Group Member 等。



井上創造 (Sozo Inoue)

2002年九州大学大学院システム情報科学研究科博士後期課程修了・博士(工学)。2002年より同システム情報科学研究科助手。2006年より同附属図書館研究開発室助教授(准教授)。2009年より九州工業大学大学院工学研究科基礎科学研究系准教授。2018年より同大学院生命体工学研究科, 2020年より同大教授。現在に至る。この間, 2017~2019年理化学研究所革新知能統合研究センター客員研究員。2022年より九州工業大学ケア XDX センター長。Web/ユビキタス情報システム, 人間行動認識, 医療介護応用に興味を持つ。情報処理学会理事およびシニア会員, IEEE, ACM, 日本データベース学会, 電子情報通信学会, 日本知能情報ファジィ学会, 日本医療情報学会会員。



二宮伸治 (Shinji Ninomiya)

1991年広島大学大学院工学研究科設計工学専攻科博士課程後期単位取得退学, 博士(工学)。同年同大学工学部助手。1998年広島国際大学保健医療学部臨床工学科助教授。2007年広島国際大学保健医療学部臨床工学科教授, 現在に至る。日本船舶海洋工学会, 日本可視化情報学会, 日本人工臓器学会, 日本医工学治療学会, 日本機械学会等の会員, 2010年日本人工臓器学会技術賞受賞。