

論文の内容の要旨

論文題目 医学研究・教育に対する工学的手法の意義

氏名 宮原和洋

序文

昨今の情報工学の発展はめざましく、医療分野においても画像診断を中心に応用が進んでいる。臨床及び教育においてもこれまで医師の主観に基づいて行われてきたことに工学的手法によって客観性を持たせることが本稿のテーマである。臨床分野においては、膵十二指腸アーケード動脈瘤の発生要因を臨床例と電気回路モデルシミュレーションを用いて腹腔動脈狭窄との関連について検証した。教育分野においては血管外科手術手技の **Off the Job Training** に対して画像解析による評価システムをアプリケーションソフトウェア化した。

第一章 電気回路シミュレーションを用いた膵十二指腸アーケード動脈瘤発生要因の検討

背景と目的

臨床上動脈瘤は破裂リスクの評価が重要であり大動脈瘤は形態学的要素が発生要因とされていた。一方内臓動脈瘤の一つとして、膵十二指腸アーケード動脈瘤は稀な疾患であり動脈瘤径と破裂リスクの関連が薄く、腹腔動脈狭窄との関連を指摘されているという点で特徴的である。稀な疾患ではあるが破裂した際の死亡リスクが高く病態解明の意義がある。**Case Series** と血行動態のシミュレーションによって動脈瘤の成因に関する仮説を裏打ちするエビデンスの一端を明らかにすることを目的とした。

方法

<臨床的検討>

東京大学血管外科を受診した膵十二指腸アーケード動脈瘤 12 例と胃十二指腸動脈瘤 4 例の特徴を後方視的に検討した。

<電気回路モデルシミュレーション>

解決可能な範囲でのシンプルなシミュレーションによって血行動態を明らかにした。解剖学的変異は代表的な分岐のみを扱い、電気回路としては抵抗と直流電圧のみを用いた。条件の仮定をおき流体力学的な考察か、血流量が増加する部分が動脈瘤化しやすい・腹腔動脈狭窄は血管系の狭窄とする・血管の抵抗は血管径の 4 乗に反比例し、血管長に比例するとした。アーケード動脈の血管系は正常症例 5 例の画像検査から血管径・血管長の平均を求め、腹部内臓の流量は先行報告の値を採用した。大動脈瘤に相当する電圧、腹腔動脈に相当する抵抗を仮定し、電気回路シミュレーターを用いて回路モデルの全ての抵抗値を求

めた。求めた回路を用いて腹腔動脈狭窄に応じて腹腔動脈の抵抗値を変化させ、アーケード動脈の流量にあたる電流値を求めた。その上で臨床症例の特徴とシミュレーションの結果を比較した。(東京大学医学部倫理委員会審査番号 3316-(3), 3252-(5))

結果

臨床症例では、全身疾患・組織学的脆弱性を持った症例を除き、膵十二指腸アーケード動脈瘤全例で腹腔動脈狭窄があった。胃十二指腸動脈瘤症例では腹腔動脈狭窄はなかった。アーケード動脈瘤がある症例の腹腔動脈狭窄率は全て 50%以上であった。電気回路シミュレーションモデルでは全ての抵抗値が算出可能であり、腹腔動脈狭窄に合わせて抵抗値を変化させ平均流量を求めたところ、アーケード動脈瘤では腹腔動脈狭窄が 50%を超えると血流の方向が反転し腹腔動脈狭窄が高度狭窄に近づくと流量は 3 倍以上に上昇していた。一方上腸間膜動脈や胃十二指腸動脈の流量はほとんど変化が見られなかった。

考察

臨床的な検討からは膵十二指腸アーケード動脈瘤の発生要因として、腹腔動脈狭窄による血行動態の変化、全身的・組織学的要素の関与、胃十二指腸動脈瘤をはじめとする別のタイプの動脈瘤の存在が考えられた。

電気回路シミュレーションにおいては腹腔動脈狭窄の進行によってアーケード動脈瘤の流量は劇的に増加しておりこのことが動脈瘤発生の一因を担うというシナリオも十分成り立つと考えられた。また胃十二指腸動脈や上腸間膜動脈にお動脈瘤が発生しなかったことを関連づけても良さそうであった。

今回のシミュレーションでは定常流で扱っており、血管径を一定と仮定したものの動脈は拍動流であり、またリモデリングによって形態も変化しうる。他報告において拍動流下でリモデリングについて検討したのも同様の血流の反転と変化の傾向が指摘されており本研究において導かれた傾向と一致していた。また今回のモデルでは血管変異を組み込むことが困難であり、variation による影響は検討できない。将来的には解剖学的変異を考慮して回路モデルを組み替えることが可能となるようなシステムによってシミュレーションの改善が期待できると考えられた。

第二章 Off The Job Training における縫合評価のためのアプリケーション構築

背景と目的

外科手技の修練はこれまで On the Job Training が中心であって実際の診療上で指導がなされてきたが、昨今 Off the Job Training の社会的需要が高まっている。修練において重要な技能評価は、経験のある上級医による主観的な評価が中心であった。手技時間など客観性があるものも用いられているが技能そのものを反映しているとは言い難いものであった。先行研究において縫合画像の出来栄を画像処理によって評価する方法が提唱されているがリアルタイムで評価することは困難であった。縫合の客観的評価を簡潔・速やかに可能とするアプリケーションソフトウェアを開発し、運用して評価することで医学教育分

野における工学的アプローチの意義について検討することを目的とした。

方法

<システム構築>

Web アプリケーションとクラウドコンピューティングを組み合わせで開発した。Web アプリケーションではユーザー認証、縫合糸をなぞる機能、画像のアップロードと計算結果の表示を担当させ、クラウドでは画像の保存と画像処理、評価指標の計算の機能を持たせた。評価指標としては縫合糸の見えている部分の長さをバイト、間隔をピッチとしてそれぞれ変動係数を求め、縫合糸間の角度の尖度を求め 3 要素のノルムを **Total Score** と定義した。

<システム評価>

血管外科医 5 名によって端端吻合 10 画像、端側吻合 10 画像に対して本研究のシステムを用いて評価をさせ、主観的評価も同時に行った。主観的評価は習熟度に応じて 10 段階で評価した。それぞれの指標評価者間のばらつきと相関について検討した。

(東京大学医学部倫理委員会審査番号 11567)

結果

<システム構築>

作成したアプリケーションは安定して稼働した。ソースコード及びデモ動画を公開した。

<システム評価>

Total Score は 0.25-0.76 で分布し、5 人のユーザー間での級内相関係数(ICC(2,1))は 0.92 であった。全ての項目において評価者間のばらつきは小さかった。主観的スコアについては 2 - 10 で分布し、ユーザー間での級内相関係数(ICC(2,1))は 0.51 であった。**Total Score** と主観的スコアの相関係数は 0.03 であり、強い相関関係にあるとは言えなかった。縫合画像において縫合数を 12 以上と 11 以下に分けると、12 以上のものの相関係数は-0.47, 11 以下のものは 0.38 であり、図 11 に示すように二つの傾向がある可能性が示唆された。

考察

本研究のシステムは臨床医にとっても簡潔・適切に使用可能であった。客観的指標は評価者間のばらつきを小さく評価することが可能であった。縫合糸の数によって **Total Score** と主観スコアの傾向が異なる二つの群に分けうる可能性があり、主観的評価のばらつきが原因であると推測した。主観的な見栄えの評価がヒトの認識に影響されることがあり、やはり客観的指標の確率は重要であると考えられた。また、本システムでは二次元の画像評価であり縫合画像全体の評価とは言えず、これも主観的評価との乖離につながっている可能性があった。評価項目としては重み付けのないノルムを用いたことも関連していると考えられ、縫合全体での評価や吻合血管でのリークテストとの結果との関連性、評価項目の改善によってシステムの縫合評価能力の向上が必要であると考えている。本システムを血管外科学会主催のワークショップで試用したところ速やかな評価、フィードバックを可能としたことでワークショップ参加者の満足度を高める結果となっており、大きな社会的

意義を果たしうる可能性が示唆された。このように医学教育においても工学的手法を持ち込み、統合して問題解決に取り組むことの重要性を提示できたと考えている。

結語

臨床および教育における工学的手法の意義の探究を行った。臨床においては膵十二指腸アーケード動脈瘤の発生要因に対して症例の解析およびシミュレーションモデル作成した。本研究のようなシンプルなシミュレーションが全体の治療ストラテジーの方向性を左右しうる可能性がある。

医学教育分野においてはアプリケーションソフトウェアの作成によってリアルタイムでスコアリングができ、術者にフィードバックできることが可能であった。近年社会的需要が高まっている **Off the Job Training** におけるシステムのエビデンス作りに貢献する一助となったと考えた。

工学的手法のサポートは今後需要の増大が予想され、医療者側としては積極的に取り入れていくべきだと考えられた。