

# 人間工学を応用した ロボット鉗子新型操作部の開発

Development of New Controller for Robotic Forceps Based on Ergonomic Studies

富岡 慶 神野 誠

■ TOMIOKA Kei

■ JINNO Makoto

東芝では腹腔（ふくこう）鏡下手術用に高機能化した鉗子（かんし）として、ロボット鉗子の開発を行っている。より使いやすいロボット鉗子の操作部を開発するため、人間工学を応用した反復設計を実施した。初期に開発したロボット鉗子を使用した動物に対する施術を撮影したビデオを分析することで、ユーザーの要求事項を明確にした。これに基づき新たな操作性のコンセプトを策定し、鉗子先端部の持つ三つの自由度を個別に制御する新型操作部を試作した。ユーザーによる評価の結果、策定したコンセプトの受容性が確認され、試作と評価を繰り返すことで新型操作部の操作性向上を図った。

Endoscopic surgery is highly regarded as a minimally invasive type of surgery. Toshiba has been developing robotic forceps as a functionally enhanced apparatus for laparoscopic surgery. To increase the usability of the master grip (controller) of robotic forceps, iterative design processes based on ergonomic studies were applied to its development. User requirements for robotic forceps were captured by motion analysis of video recordings made of experimental operations using existing robotic forceps. Based on these user requirements, the usability concept for a new controller was established and a preliminary prototype was developed equipped with three separate operational devices to control the gripper of the forceps.

The acceptability of the usability concept of the prototype was verified through user testing. Moreover, by means of evaluations iteratively carried out with users, small modifications were made to the prototype to further improve usability.

## 1 まえがき

低侵襲性の術式として、内視鏡下手術が有望視されている。内視鏡下手術とは、腹腔や胸腔に内視鏡を挿入し、ビデオカメラで撮影された映像を見ながら鉗子などの器具を用いて手術を行うもので、利点としては、手術創が小さく術後の回復が早いことなどが挙げられる。一方、従来の手術に熟練した外科医であっても、内視鏡下手術を安全に実施するためには一定のトレーニングが必要となる。鉗子の機能性と操作性の向上が内視鏡下手術の今後の発展と普及の鍵となっている。

東芝では、内視鏡下手術用の手術器具として、一体型マスタスレーブマニピュレータ（以下、ロボット鉗子と記述）の開発を行っている<sup>(1)</sup>。初期の試作機では、多数の医師による操作性評価やin vivo実験を通じてロボット鉗子の有効性が確認された一方で、操作性については改善すべきいくつかの点が示唆された。そこで、人間工学を応用し反復設計を行うことでロボット鉗子の操作性向上を図った。

## 2 同構造型ロボット鉗子

初期に開発したロボット鉗子操作部は同構造型と呼ばれ、

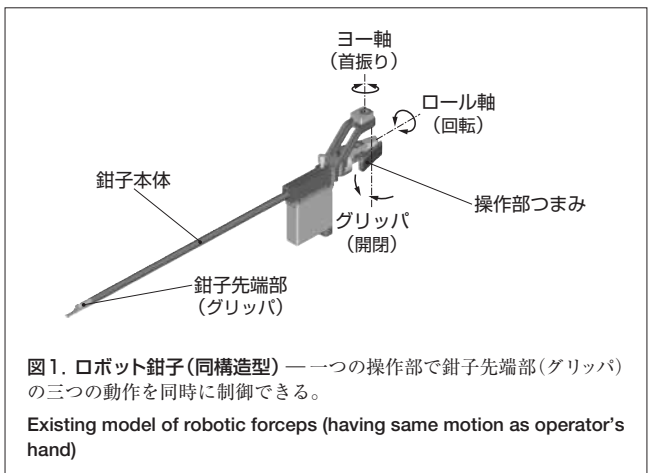


図1. ロボット鉗子(同構造型) —一つの操作部で鉗子先端部(グリッパ)の三つの動作を同時に制御できる。

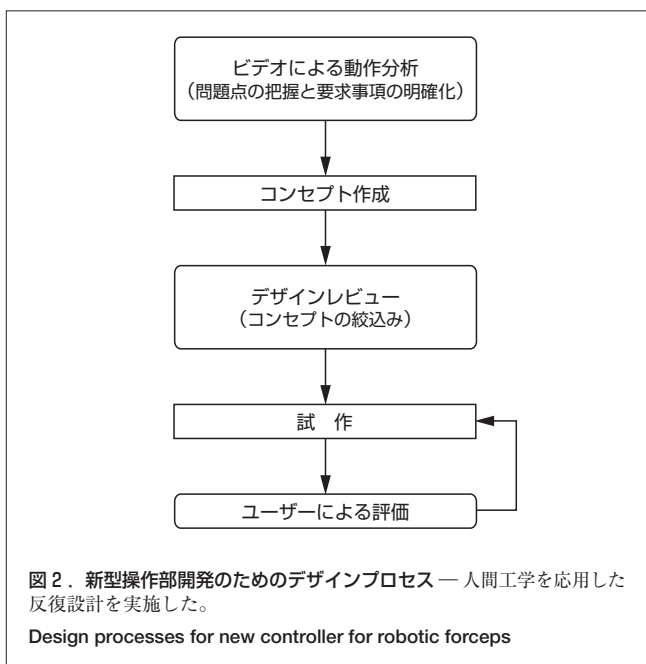
Existing model of robotic forceps (having same motion as operator's hand)

操作部と鉗子先端の作動部が同じ自由度を持ち、操作する手指の動きと鉗子先端の動きが一致することで、直感的な操作を実現した。具体的には図1に示す操作部つまみを開閉することでグリッパと呼ばれる鉗子先端部の開閉動作が、つまみを左右に振ることでグリッパの鉗子本体軸に対する首振り（ヨー）動作が、つまみを回転させることでグリッパの回転（ロール）動作がそれぞれ可能である。これらの操作と鉗子本体軸の回転操作により、グリッパの姿勢を自由に決定することが可能である。

操作部つまみを握る手指の動作や姿勢とグリッパの動作や姿勢が一致することで、グリッパの姿勢を決定する際のユーザー（術者）の認知的な負担は低く従来の手技をほぼそのまま再現することができる。しかし、in vivo実験などによる評価の結果、操作時に手首や前腕の負担が大きくなり、疲労するケースが散見された。

### 3 新型操作部の開発プロセス

上述した問題を解決し更なる操作性の向上を図るために、人間工学を応用した反復設計を実施した。図2にロボット鉗子の新型操作部を開発するにあたり実施したデザイン活動の概略を示す。



まず、同構造型ロボット鉗子を用いて行ったin vivo実験の様子を撮影したビデオをもとに施術の動作分析を行い、問題点の把握とロボット鉗子の操作における術者の要求事項を明確にした。次に、明らかとなった問題点を解決し、要求事項を満たすコンセプトを複数作成した。関係者によるレビューの結果、疲労の軽減など操作性を向上させるうえでもっとも有効と思われるコンセプトを選択し、一次試作機を作成した。この試作機を医師に評価してもらい、コンセプトの有効性と操作性改善の程度を確認した。更に、評価結果に基づき一部を修正した二次試作機を作成し、再度医師による評価を受け修正結果を確認した。

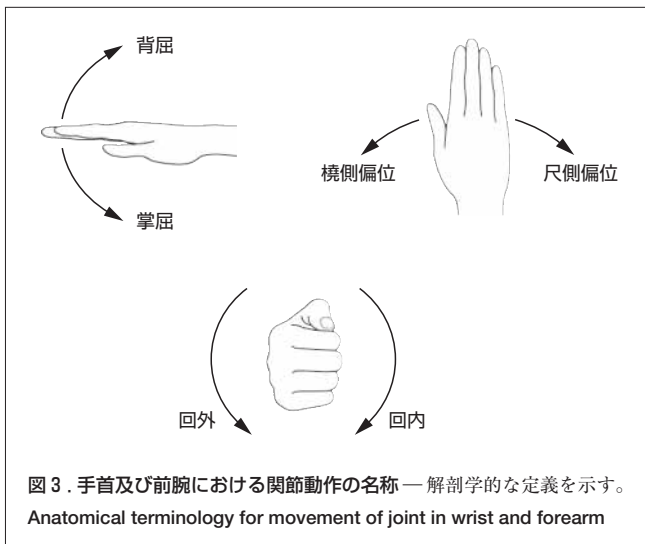
次章以降で、最初のデザイン活動である動作分析とその結果に基づき作成したコンセプトを中心に、新型操作部の開発プロセスの詳細を説明する。

### 4 動作分析による問題点と要求事項の明確化

in vivo実験を撮影したビデオ映像を分析した結果、同構造型操作部において以下の問題点が明らかとなった。

#### 4.1 術者の関節可動域による機械的な可動域の制限

手指の動きと鉗子先端部の動きや姿勢が一致することが、同構造型の最大の特長であるが、同時にこれは手首関節が動作できる範囲でしかロボット鉗子が操作できないことを意味している。またこれは、ロボット鉗子の最大の特長である、鉗子を多自由度・多関節化することで従来は不可能であった方向からの縫合や結紮（けっさつ）を可能にするという機能を損なうことにもなりかねない。図3に手首関節動作の解剖学的な定義を示す。ビデオを分析した結果、多くの作業を関節可動域の限界付近（橈側（とうそく）／尺側偏位あるいは掌屈／背屈させた状態）で実施しているようすや、その状態から手首を回転（回内・回外）させようとするなど無理な動作が観察され、これらが手首に負担を掛ける原因であり操作性を悪くする要因の一つであると考えられた。



#### 4.2 鉗子本体の姿勢制御の困難

また、鉗子先端の姿勢を決めるにあたっては、鉗子本体の位置決め（患部への挿入角度・深さ、本体軸回転）や保持も重要となるが、同構造型ではこの鉗子全体の位置決めや保持と先端部の制御を同じ操作部によって行う。先端部制御のために可動する操作部を使つての鉗子本体の位置決めや保持には慣れが必要でやや困難である。また、いったん本体軸の姿勢を決めても鉗子本体の自重によりこの姿勢が変わってしまうなどの問題があり、実際施術中にロボット鉗子を持つ手とは反対の手で鉗子本体軸の姿勢を調整するようすが観察された。鉗子本体軸の姿勢制御を容易にすることも、ロボット鉗子の操作性を向上させるものと考えられた。

## 5 新型操作部コンセプトの策定と試作

同構造型は操作部を握る手指の姿勢と鉗子先端の姿勢が一致することで直感的な操作が可能であり、手首を使うような従来の手技が再現できることをコンセプトとしている。このコンセプトはたいへん優れており、手首に負担が掛かるケースは散見されるものの、このコンセプトを具現化した操作部として同構造型はほぼ完成形に近いものと考えられた。そこで、新型操作部のコンセプトは同構造型のコンセプトとは異なる視点から検討を進めることとした。

### 5.1 身体負担の軽減と機械的可動域に対する制限の除去

新型操作では、術者の関節可動域によるロボット鉗子の機械的な可動域の制限をなくすことをコンセプトの一つとした。これは、術者に対する身体的な負担を取り除くことと、様々な方向からの縫合や結紮を可能にするというロボット鉗子の機能を最大限生かすことを意味する。

ビデオ映像を動作分析した結果、施術のタスク(作業)としては、まず、患部に対する鉗子先端のアプローチを決定するための鉗子本体の位置決めがある。このとき、鉗子先端の姿勢を維持したまま鉗子本体を動かすと手首が屈曲したり偏位したりし負担が掛かる場合がある。例えば、患者に対して横方向から鉗子を挿入するケースや、縦方向(下腹部側から)から挿入するケースなどである。鉗子先端の姿勢に影響を与えることなく、どのような角度から鉗子を挿入しても手首に負担を掛けない仕組みを検討することとした。

### 5.2 鉗子先端部動作軸の個別制御化

一つの操作部で鉗子先端部の二つの動作軸(ロール軸、ヨー軸)を同時に制御できることが同構造型のコンセプトであるが、動作分析の結果、2軸を同時制御による縫合や結紮作業には相当の熟練を要するものと思われた。また、動作分析の結果、多くの縫合作業では、まず鉗子本体の位置・姿勢決めをし、次にヨー軸による刺入角度を設定し、そしてロール軸により縫合する、というようにタスクがシーケンシャルに行われていることも判明した。これは、鉗子先端部のヨー軸とロール軸を必ずしも同時に操作する必要がないことを意味している。そこで、鉗子先端部の姿勢や位置決めをより容易にするためにもう一つのコンセプトに、同構造型では一つの操作部に割り付けられている鉗子先端部の二つの動作軸に対する操作を、別々のデバイスに割り付けるアイデアを検討することとした。

これにより、以下に示すコンセプトに基づき、複数の操作部案を作成した(図4(a)-(c))。

- (1) 術者の手首や腕に対する負担の軽減
- (2) ロボット鉗子の機械的可動域に対する術者の関節可動域による制限の除去
- (3) 鉗子先端部の姿勢や位置の容易な制御

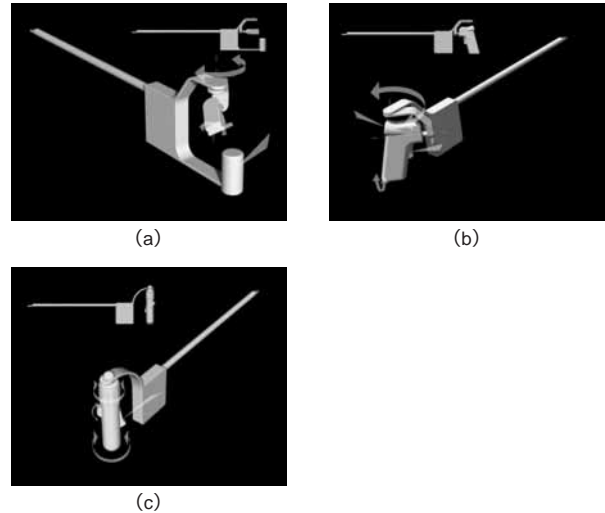


図4. 新型操作部案 — 立案したコンセプトから複数の操作部案を検討した。

Design ideas for new controller for robotic forceps

#### (4) 鉗子本体の容易な操作(位置決め・保持)

関係者によるレビューの結果、上記コンセプトをもっとも満足するソリューションとして、図4(c)に示す操作部案をベースに試作機(図5)を作成し、評価することとした。

新型操作部(以下、ローラ型操作部)では、鉗子本体を保持するグリップを採用し、そのグリップ上に鉗子先端の姿勢を制御するデバイスを配置した。グリップ上部に取り付けられたローラは、鉗子先端部のヨー軸を制御するデバイスで、グリップ背部に取り付けられたローラでロール軸を制御する。グリップの開閉はグリップ前部に取り付けられたトリガにより行う。



図5. 新型操作部一次試作(左)と二次試作(右) — 試作と評価を繰り返すことで操作性の向上を図った。

Preliminary prototype (left) and modified prototype (right)

グリップ自体は鉗子先端部の姿勢操作にかかわらず鉗子本体に対して自由に回転することができるため、術者から遠い位置にあっても極端に近い位置にあっても手首に屈曲などの負担が掛からない。また、グリップが鉗子本体に取り付けられているので、鉗子本体の位置決めや保持は容易である。

これにより、術者の関節可動域によるロボット鉗子の機械的な可動域の制限を取り除き、身体的な負担を軽減し、鉗子先端部の制御や鉗子本体の操作が容易である、というコンセプトを実現した。

## 6 ユーザーによる評価

試作したローラ式操作部を共同研究のパートナーである慶應義塾大学医学部に持ち込み、同構造型の開発にも携わり同タイプの操作に習熟した医師により、操作性の評価とコンセプトの受容性確認を実施した。その結果、操作性に関しては、手首をひねることがなくなり疲れない、鉗子先端部の姿勢や動作に関し直感的ではなくなったが先端部の姿勢決定が楽になった、縫合が楽になった、片手で操作できる点が良い、慣れればとてもよいと感じた、というポジティブなフィードバックを得た。そして、従来とはまったく異なるコンセプトについては、より多くのユーザーによる評価の必要性は指摘されたものの、おおむね受容されるとの印象を得た。また、二つのローラやトリガの位置など、改善すべきいくつかの点が明らかとなった。この評価結果をもとに、図5(右)に示す二次試作機を作成した。

二次試作機を慶應義塾大学医学部で再度評価したところ、前述したコンセプトを具現化した形態としては、ほぼ完成形とのコメントを得た。また、これとは別に、同構造型とローラ型操作部を用い、20名の外科医による実操作性評価を実施したところ、約70%の外科医がローラ型操作部の方が操作性に優れると回答した<sup>2)</sup>。ただし、このデータはローラ型が操作性において絶対的に優位であることを示すものではなく、操作性に対するユーザー(術者)の好みの違いを示すものと考えられる。すなわち、どちらか一方を選択し実用化するのではなく、コンセプトや特徴の異なる機種をラインアップとして用意することで、より多くのユーザーの目的を達成し、高い満足度を得ることができると考える。

## 7 人間中心設計の重要性

ここで紹介した、ロボット鉗子の新型操作部の開発で実施した一連のデザイン活動は、人間中心設計プロセスと呼ばれる製品開発手法である。人間中心設計プロセスは常にユーザーの視点に立った製品開発の方法で、ユーザーとの対話によりユーザーのニーズや要求事項を明確にすることから始

まり、それらを満足するソリューションを作成し、ユーザーに評価してもらうというステップを繰り返す、ユーザー参加型の反復設計である<sup>3)</sup>。これにより、より使い勝手の良い製品やシステム、サービスが開発でき、結果的にユーザーの満足度を高めることができる。

これまで述べてきたように、ロボット鉗子の新型操作部開発においても人間中心設計プロセスは真価を発揮し、その結果操作性に優れた操作部を開発することができた。

## 8 あとがき

ここで紹介したような医療機器にとどまらず、今後も様々な商品やシステム、サービスの開発に人間中心設計を適用することでより優れた商品を提供し、顧客に笑顔と安心を届け続けたい。

なお、この論文は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の健康寿命延伸のための医療福祉機器高度化プログラム、早期診断・短期回復のための高度診断・治療システムの開発「内視鏡等による低侵襲高度手術支援システム」(2000-2004)により実施した研究開発成果に関連するものである。また、共同研究パートナーである慶應義塾大学医学部の北島先生、森川先生、小澤先生に感謝の意を表します。

## 文献

- (1) 神野 誠. 腹腔鏡下手術支援用ロボット鉗子. 日本ロボット学会誌. 22, 4, 2004, p.439-443.
- (2) 砂押貴光, ほか. “簡易型操作部を有する内視鏡下外科手術用ロボット鉗子の開発”. 第22回日本ロボット学会学術講演会論文集, 岐阜, 2004, 2H11. (CD-ROM).
- (3) ISO 13407: Human-centred design processes for interactive systems. 1999.



富岡 慶 TOMIOKA Kei

デザインセンター デザイン戦略担当主務。人間工学を応用した製品やシステムのユーザーインターフェース開発に従事。日本人間工学会, Human Factors and Ergonomics Society 会員。Design Center



神野 誠 JINNO Makoto, D.Eng.

研究開発センター 事業開発室グループ長, 工博。ロボット鉗子の研究・開発に従事。日本機械学会会員。Corporate Research & Development Center