腹腔鏡下手術支援用 Scrub Nurse Robot の開発

吉 光 喜太郎*・宮 脇 富士夫*・貞 弘 晃 宜*
大 沼 健太郎*・橋 本 大 定**・正 宗 賢***

Development of Scrub Nurse Robot for Laparoscopic Surgery

Kitaro YOSHIMITSU*, Fujio MIYAWAKI*, Teruyoshi SADAHIRO*,
Kentarou OHNUMA*, Daijo HASHIMOTO** and Ken MASAMUNE***

In operating rooms of large hospitals in the developed countries, the problem of the shortage of scrub nurses in operation rooms has become serious. To compensate for this shortage, we have proposed Scrub Nurse Robot (SNR) system to assist a surgeon in exchanging surgical instruments during endoscopic and laparoscopic surgery. On design of the First SNR, motion capture system in an operating room to collect and analyze data of motions of a surgeon and a scrub nurse is constructed. Specifications of the First SNR are decided by consideration of the data of motion analysis. We evaluate exchanging motions of the First SNR using motion capture software and recognize that R-1 is faster than a human scrub nurse in helping a surgeon exchange an electric knife and a blood aspirator, which are used most frequently during operations, although R-2 is not so faster in the case of the other instruments. And we also recognize that the First SNR's minimum working space is 1.68 [m²]. Then, we develop 2nd SNR (ASULA) which is made its minimum working space small to 0.31 [m²] to be used in small operating rooms. ASULA is designed as one robot changing from 2 of the First SNR. ASULA recovers all of works that the First SNRs do, and adapts to the other functions, e.g. instruments cleaning system which is one of the most important task of scrub nurses. As a user interface of ASULA, voice recognition and reproducing system is installed. We construct a voice answering database. It is a data aggregate of words which are used in videotaped conversation between a surgeon and a scrub nurse during operations and which seems to be necessary. For the development the robot that exchanges surgical instruments with a surgeon, motion analysis to recognize a variety of data of a surgeon and a scrub nurse are important for unerring judgment for deciding the best specifications of the robot and the construction of the useful interfaces. Therefore, our development of SNR is one of the system integration pursuing a contribution for medical field by an assimilation of measurement field and mechanical design.

Key Words: Scrub Nurse Robot (SNR), motion analysis in an operating room, endoscopic and laparoscopic surgery

1. 緒 論

現在の医療・福祉の分野においては、最先端の技術の導入によってさまざまな医療機器のメカトロニクス化が行なわれている。とりわけ外科手術領域においては医工学連携が進んでおり、工学分野と医療分野は切り離すことのできない時代を迎えている^{1)~7)}。腹腔鏡下手術⁸⁾はこのような連携の成果が活用されている術式の1つである。腹腔鏡下手術は、腹壁に小さな数個の穴を開け、腹腔に挿入した細径内視鏡の映像をモニターテレビで観察しながら、長くて細い特殊な器具

(鉗子や電気メスなど)を用いて行なう手術である。従来の開腹手術と異なり、体壁を大きく切り開かずすみ、体腔内の臓器を手術室の冷たい乾燥した空気に長時間晒さないなどの大きな利点がある。このため、術後の疼痛がほとんどなく、術後の回復や社会復帰がきわめて早く、美容的観点からも著しく優れているなど、多くの特長を有している。一方で、すべての手術操作は、トロカールを経て腹腔内に挿入された内視鏡によりモニターテレビに映し出された画像を見ながら行なわれるため、開腹手術に比べ手術視野は格段に狭く、腹腔鏡の向きと目線や操作線が異なっているなど、執刀医にとって困難な点が多い。さらに操作に熟練を要する専用の手術器具を使用して処置を行なうため、手技が求める技術的な負担は大きい。このような困難を解消するために、微細な動作を可能とする鉗子を搭載した遠隔操作型外科手術ロボット da Vinci⁹⁾ (Intuitive Surgical) や、執刀医がカメラ助手の補助

* 東京電機大学 埼玉県比企郡鳩山町石坂

** 埼玉医科大学総合医療センター 川越市鴨田辻道町 1981

*** 東京大学 東京都文京区本郷 7-3-1

(Received April 4, 2006)

(Revised February 1, 2007)

なしに意のままに内視鏡を操作できる内視鏡把持装置 Naviot¹⁰⁾ (HITACHI)に代表されるように、先端技術を駆使し、低侵襲化を目的とした手術支援メカトロニクスが開発されている。

執刀医が使用する器具の受け渡しは器械出し看護師(英語では Scrub Nurse という)によって行なわれるが、大病院における看護師の人員不足は世界的な問題であり^{11),12)}、特に手術室勤務の器械出し看護師に関しては、その特殊性・専門性のためか、慢性的な人員不足は深刻な問題となっており、そのため、経験の浅い器械出し看護師が執刀医に要求された器具を探すのに多くの時間を要したり、間違った器具を手渡してしまうことで執刀医の手術進行の妨げになることがある。そこでわれわれは内視鏡・腹腔鏡下外科手術を対象に、熟練器械出し看護師の代替として手術野における外科操作の進行状況、執刀医としての技量や経験の有無などに適応し、つぎに執刀医が必要とする器具を予測した上で、すばやい器具の交換作業を遂行できる Scrub Nurse Robot (SNR) システムを提案し、その開発を行なっている¹³⁾。本稿のタイトルは腹腔鏡下手術用 SNR の開発としているが、これは後述する手術情報(手術中動作計測など)がもたらす腹腔鏡下手術で得られてきたためであり、SNR は決してこれに限定されるものではなく、内視鏡・腹腔鏡下手術全般をその支援対象としている。執刀医に器具を手渡すロボットとしては、米国の Robotic Surgical Tech, Inc. が開発した Penelope が報告されている¹⁴⁾。Penelope はユーザインタフェースとして音声認識機能が用いられ、執刀医の発する言葉に対応し駆動するロボットである。しかしながら Penelope は小外科手術用の器具出しロボットであるため、扱う器具数が多いにもかかわらず、執刀医の要求に対して1本のアームで対応している。そのため目まぐるしく器具が要求される場面においては、執刀医からの要求に対して満足に応えられない可能性がある。また日本では特定非営利活動法人先端医療推進機構の林衆治氏らが開発している「手渡しロボット」がある¹⁵⁾。このロボットは内視鏡下手術で利用されることを目的としたロボットであり、ユーザインタフェースとしては Penelope と同様に音声認識が用いられている。鉗子マガジンと呼ばれるホルダは20種類の鉗子を積載でき、バーコードによって器具の種類を特定している。しかしながらこのロボットは内視鏡下手術で頻繁に使用される電気メスや、血液吸引管の受け渡しはされておらず、受け渡す器具も執刀医の手元まで運ばれてこないため、執刀医は手を伸ばして器具を受け取らなくてはならない。

手術室で使用する機器はその使用目的から当然患者の近接位置で使用される場合が多い。本稿で述べる SNR も執刀医との間で器具の交換が行なわれることから、患者がいる手術台の近くに設置することを想定している。このことから SNR の作業領域内に執刀医・助手、およびほかの医療機器が入ることが考えられ、何らかの理由で SNR が制御を逸脱し誤動作を起こした場合に、自由に動くことができない患者

への危険を回避するために、自由度や動作領域をできる限り低減した設計をする必要がある。また、手術室での使用に際しての重要事項として、手術野の感染防止が挙げられる。手術室内では清潔部・非清潔部が厳密に定められており、手術野において使用される器具・機器は手術前に滅菌処理を行なうことが必要である^{16),17)}。そのため滅菌性・清潔性を考慮した設計が求められる。

本稿では世界的に不足している手術室器械出し看護師の代替となり、腹腔鏡下胆嚢摘出手術で使用されることを目的とした SNR の開発手法について述べる。まず SNR 1号機の開発にあたって、要求仕様を決定するために、執刀医・器械出し看護師の動作解析を行なう。そこで、手術室における動作計測システムを構築する。手術環境に関する情報、動作解析結果を踏まえた上で、SNR 1号機を設計・製作する。つぎに SNR 1号機の動作検証を行ない、器械出し看護師との交換動作に関する比較を行なうことで SNR の有用性を検討する。SNR 1号機の動作検証結果を踏まえ、SNR 2号機 (ASULA) の仕様を決定し、設計・製作を行なう。

2. Scrub Nurse Robot 1号機の開発

2.1 執刀医・器械出し看護師の動作計測による SNR の仕様決定

SNR 1号機の仕様を決定するために、執刀医・器械出し看護師の動作計測システムを構築した¹³⁾。手術室内に Fig. 1 に示したように計測用のデジタルカメラを2台配置し、手術中の執刀医および器械出し看護師の動作を録画した。その動画を元に3次元動作解析ソフト((株)DKH社製 Frame DIAS 2)を用いて、それぞれの頭、胸、右肩、右肘、右手首の各部位の運動データを解析し、後述の情報を取得した (Fig. 2)。

Fig. 1 Arrangement of the measurement system

まず器械出し看護師と執刀医の間における器具の交換位置は、執刀医によって個人差はあるものの、一定の空間内で交換されていた。そこでロボットは、特定の位置に正確に器具を提供できるような機構にする必要がある。また、受け渡し時の動作検証結果から器械出し看護師が器具を手渡す際の肘角度は約120 [deg]であることが確認された(Fig. 3)。受け渡し動作の測定は47回行なった(電気メス9回、血液吸引管16回、長鉗子類22回)。Fig. 3にその代表例を示した。腹腔鏡下胆嚢摘出手術では、執刀医と器械出し看護師は器具用トレイを挟んで斜めに向かい合って作業を行なう。さらに器具の落下を防ぐために、執刀医と器械出し看護師は器具用トレイに体を密着させて器具交換動作を行なうのが通例である。したがって執刀医と器械出し看護師との距離関係は一定に保たれる。また腹腔鏡下手術で使用される器具の長さは約400 [mm]と共通しており、特に長鉗子類に関しては先端部の形状が異なるのみで、ほかの部位はすべて同形状の器具を使用している。したがって器具によって受け渡し方が極端に

異なるケースは稀であると考えられる。以上で述べた2つの理由により、執刀医と器械出し看護師の間で行なわれる器具交換動作の際に、器具を手渡す看護師の肘角度が大きく異なるということは考えにくい。ロボットが器械出し看護師の代替として最適な交換動作を行なうための機構条件は、SNRにアームを設け、肘角度を器械出し看護師の手渡し時の肘角度と同様に120 [deg]とし、定位置にすばやく器具を提供できる機構とする。これによって器械出し看護師の模倣動作が可能となり、臨床に導入する場合も、馴染みのある形状や動作により、執刀医に違和感を与えることなく手術環境に定着すると考えられる。

つぎに手術器具種類、各種器具を使用する順番、使用頻度の基礎的な解析を行なった。その結果、限られた器具数の中でも、電気メスおよび血液吸引管の2つの器具が、手術時間のおよそ半分を占めるほど高い頻度で使用されていることが認められた。Table 1に腹腔鏡下胆嚢摘出手術3症例におけるデータを示した。腹腔鏡下胆嚢摘出手術は、前述のように定型的な手術手順で行なわれ、使用される器具数も限られているが、電気メスおよび血液吸引管の使用割合は、脂肪の癒着や突然の出血への対処により増加する場合が考えられる。したがって使用頻度の高い電気メス、血液吸引管のみを手渡す単純な機構のロボットが存在すれば、手術時間の約半数がこの2種類の器具を交換するロボットの作業時間となるため、器具の交換に要する時間は大幅に短縮され、手術が円滑に進行することが期待できる。

2.2 R-1機構概要

Fig. 4に開発したR-1、Table 2にその仕様を示した¹⁸⁾。R-1は、手術動作計測により高頻度の使用が確認された、電気メスおよび血液吸引管の受け渡しをする6自由度のロボットである。

胴体内には直動機構を搭載した。これは執刀医が差し出した手の高さにロボットのハンド部の高さを変化させることで、交換動作の円滑化を図るためである。同じく胴体内には両肩を回転させるモータを搭載した。このモータはFig. 4 (b)、(c)における点Aの下部に搭載されており、その動

Fig. 2 PC monitor on the motion analysis

Fig. 3 Angular of a nurse's right elbow. ① Receiving forceps ② Reach out to another forceps ③ Picking up another forceps ④ Handing to a surgeon ⑤ Releasing another forceps

Table 1 Usage rate of an electric knife and a blood aspirator

Date of Operation	Usage Rate of an Electric Knife and a Blood Aspirator	The Number of Surgical Instruments
22 Jul. 2005	44.9 [%]	15
8 Dec. 2005	47.6 [%]	18
19 Dec. 2005	43.4 [%]	15

Fig. 4 First SNR R-1. (a) Full view of R-1 (b) Top view of original position of arms (c) Top view of exchanging position of arms

力はアーム内部の伝達機構により点 B, C を回転させる。それによってアームは初期位置(Fig. 4(b))から片腕を前方に出し、片腕を後方に引くことで器具の受け渡しを行なう機構になっている(Fig. 4(c))。アームの肘部は 120 [deg] に屈曲させている(Fig. 4(b))。

手首には回転機構を設置し、時計回り、反時計回り方向に 60 [deg] ずつ回転することによって、器具を手渡す際に術者が受け取りやすくなるように、器具の把持角度を変えることを可能とした。

ハンド部には空圧で開閉するアクチュエータを搭載している。空圧アクチュエータを用いることで、モータやギヤなどの複雑な機械的機構を伴うことがなく、機械が器具を汚すことがないため、器具の清潔を維持することが可能である。アクチュエータから突起している 2 箇所の金属部に、指としてステンレスの加工板を取り付け、先端の器具を把持する部分にはスポンジ板を貼り付けることで器具の落下防止を図っている。スポンジ板は容易な取り外しが可能で、手術のたびに使い捨て使用ができるように滅菌性を考慮した設計となっている。将来的には滅菌を考慮し、各種滅菌処理を施すことが可能なスポンジ素材を用いる。

ハンド部は円滑な器具交換動作を遂行するためのキャッチ・アンド・リリース機能¹⁹⁾を搭載しているし(Fig. 5

(b))。キャッチ機能に関しては、スポンジ板が取り付けられている金属板に、光学式赤外線透過型センサの投光部・受光部を取り付け、指の間に返却された器具を検知することで、ロボットが器具をつかむ動作のトリガとしている(Fig. 5(a))。またリリース機能に関しては、上記のステンレス加工板に歪ゲージを接着し、器具を引くときに生ずる歪を検知することで、ロボットが器具を離す動作のトリガとしている(Fig. 5(c))。これらの機能により、ロボットとの器具交換は、人と器具交換をしているようにスムーズなタイミングで行なうことが可能となっている。

2.3 R-2 機構概要

Fig. 6 に開発した R-2、Table 3 にその仕様を示した¹⁸⁾。R-2 は長鉗子類の交換作業を担う 9 自由度のロボットである。

ツールチェンジャ、アーム内部には R-1 の胴体内同様に執刀医の手元高度まで合わせるための直動機構を搭載している。さらにアーム中央部に搭載したモータの軸にピニオンギヤ、アーム本体にラックギヤを取り付けることにより、アームが左右に 200 [mm] ずつスライドする機構とした。これ

Table 2 Specifications of R-1

R-1	
Size [mm] (Height×Width×Depth)	600×700×910 (Min Depth Range)
Shoulder Joint Angle [deg]	±30
Wrist Rotating Angle [deg]	±60
Gripping Stroke [mm]	6~14
Depth Range [mm]	400
Weight [kg]	43
Degree of Freedom	6

Table 3 Specifications of R-2

R-2	
Size [mm] (Height×Width×Depth)	500×1100×L : 890 R : 850 (Min Depth Range)
Arm Strok [mm]	±100
Shoulder Joint Angle [deg]	±180
Wrist Rotating Angle [deg]	±60
Gripping Stroke [mm]	4~13
Depth Range [mm]	400
Weight [kg]	70
Degree of Freedom	9

Fig. 5 The catch and release mechanism. (a) Finger parts of first SNR (b) Position of optical sensors (c) Position of strain gauges

Fig. 6 First SNR R-2

は執刀医の手元の位置まで器具を提供する仕様を重視した設計となっている。R-2はアームがツールチェンジャとの間で複数の器具交換を行なうため、R-1のようにアームを出し引きする機構ではなく、アーム下部に回転機構を設けることで、アームがツールチェンジャとの間で器具交換を行なう機構とした。そのためR-1のようにアームを出し引きし、執刀医の受け取りやすい位置に器具を差し出すことができない。これを補うために直動スライド機構を設けることで執刀医の手元の定位置に器具を差し出せるようにしている。

ツールチェンジャ部にはステンレスとジュラコーンによって作製したホルダを6つ取り付け、長鉗子類を把持する仕組みとなっている。これらのホルダは容易に取り外して滅菌処理をすることが可能である。ツールチェンジャ本体はアーム間との交換の際に長鉗子類との干渉が想定されることから、回転機構として空圧回転アクチュエータを用いることで清潔性を考慮した設計とした。空圧アクチュエータは時計回りに60 [deg] ずつ回転し、ハンド部に一番近い位置にあるホルダに把持されている器具が提供される機構となっている。

手首にはR-1と同様の動作を行なうことを目的とした回転機構を設置した。また手首を空圧ロックで固定することで、容易な取り外しができることから、ハンド部そのものの滅菌処理が行ないやすく、滅菌性を考慮した設計とした。

ハンド部にはR-1と同様に器具を把持するための空圧アクチュエータ、およびキャッチ・アンド・リリース機能を搭載している。

3. 器具の交換時間の比較による SNR の有用性の検討

開発した SNR 1 号機について、SNR 1 号機の臨床での適応可否を判断することを目的とし、その判断材料の1つとして、器具の交換時間に関する検証を行なった。

3.1 検証方法

以下に示す A と B の事象について比較し、SNR 1 号機の有用性を検討した²⁰⁾。

A) 執刀医の代役と SNR 間における器具の交換動作

B) ビデオカメラで録画した腹腔鏡下手術中の執刀医と器械出し看護師間の器具交換動作

器具交換動作を比較するにあたって、両者の交換動作内で共通し、かつ確実に行なわれる動作を計測時間のトリガにしなければならない。腹腔鏡下手術における器具の交換動作には「器具先端をトロカールから抜き出す」、「器具先端をトロカール入口に合わせる」という動作が術式上必ず存在する。ここで執刀医が処置終了後から器具先端をトロカールの入口から抜き出すまでの時間や、器具をトロカールに挿入してから患部の処置を始めるまでの時間は、執刀医がいかにすばやく抜き差しするかが問われるところなので、SNR の性能評価は問えない。そのため、器具がトロカール先端から抜き出した瞬間を器具の交換動作の開始時間とし、返却、受け渡しといった動作を経て、再度器具先端をトロカール入口に合わせた瞬間を終了時間と定義した。ユーザインタフェースとして

は操作性に優れ、両手が自由となるフットスイッチを用いた。これにより執刀医代役はフットスイッチによって操作対象ロボット、および使用器具の選択をする。

今回計測した手術中における各器具の使用回数は、電気メス 9 回、血液吸引管 16 回、長鉗子類 22 回であった。執刀医の代役としては学生 5 人を被験者として採用した。今回行なう動作は基本的な器具の交換動作であり、外科医として必要とされる特別な技術を要する動作ではないため、執刀医とその代役の学生との間で顕著な違いは生じないものと考えられる。

3.2 検証結果

Fig. 7 に執刀医と器械出し看護師間、および被験者の学生と SNR 間における各手術器具の交換動作に要した時間の平均、標準偏差を示した。

3.3 考察

動作検証実験結果より、電気メス、および血液吸引管の受け渡し動作を行なう R-1 は、器械出し看護師より平均時間にして電気メスは 0.87 [sec]、血液吸引管は 0.25 [sec] 速かった。これはアームを単純に出し引きする機構の R-1 の特徴が生かせたと同時に、R-1 は左右に器具を把持しているので執刀医の代役も迷うことなく器具を選択することができた結果であると考えられる。一方、R-2 の平均交換時間は器械出し看護師より 1.93 [sec] の遅れが認められた。しかし SNR によって行なわれる交換動作時間の標準偏差値は、器械出し看護師のそれと比べて大幅に小さいことから手術器具の交換作業においてロボットを用いることにより、時間にばらつきのない器具の交換がなされることが示唆された。

さらに交換動作に 7.00 [sec] 以上要した回数について検討したところ、器械出し看護師の場合は 47 回の交換動作中 10 回であったのに対し、SNR の場合は 16 回であった。この 16 回はすべて R-2 の長鉗子類の返却動作に起因していた。実際の手術では、執刀医は使用済器具を器具用トレイ上に置き、器械出し看護師がすばやく差し出す器具を受け取って手技を続ける。器具用トレイに返却された器具は、器械出し看護師によって回収され整頓されるのが一般的であるが、SNR を導入した場合、システム内に器具用トレイが組み込

Fig. 7 Time spent in exchanging surgical instruments

まれていない SNR 1 号機は器具を執刀医に手渡しした後、返却に備えてそのままの体勢で待機していなければならない。R-1 の場合は 1 つのハンドが 1 つの器具交換を担当しているため器具が返却された後直ちにつぎの交換に備えられるのに対し、R-2 の場合は多数の器具を扱うため、返却された器具をツールチェンジャ部まで運搬し、つぎに使用される器具をツールチェンジャから抜き出して受け渡しに備えなければならない動作が加わる。そのため R-2 の返却後の器具運搬動作による器具交換時間の遅延が課題として挙げられる。また執刀医は器具の返却をする際に、待機している SNR の指の間(R-1: 14 [mm], R-2: 13 [mm])に返却しなければならない。

また、SNR の手術室における占有面積の計測をするために模擬手術室に SNR 1 号機を配置したところ、最小作業領域は 1.68 [m²] であった。手術で使用される器具を 2 台のロボットに分担させる仕様を重視したためである。日本の手術室は一般的に狭い造りになっているため、手術室への導入を考慮すると、十分な作業領域が得られず、ほかの手術機器や人との干渉の危険性がある。

4. SNR 2 号機: ASULA の開発

4.1 SNR 1 号機からの改善

SNR 1 号機は作業領域の省スペース化を十分に考慮した設計とはいえ、作業領域の縮小が課題として残った。そのため 2 号機では、SNR 1 号機 R-1 の進化型モデルとして、R-1 の有する受け渡し速度を保ち、さらに狭いスペース内での駆動を実現するための、小型化を考慮した機構設計にする必要がある。

Fig. 8 (a) The cleaning system for surgical instruments (b) Inner structure of the cleaning system (c) The cleaning mechanism

SNR 1 号機が行なえる作業は、器械出し看護師が行なう手術支援作業の中でも最も基本的な作業である、手術器具の受け渡しのみである。そこで新たに、使用済器具に付着する炭化した血液や脂肪による汚れを除去する洗浄機能を導入する。Fig. 8(a)に製作した器具洗浄機を、Fig. 8(b)にその内部構造を示した。器具洗浄機は器具を洗浄する 2 つの円筒状の洗浄ローラが配置された上段部と、ローラを回転させるためのアクチュエータを内蔵した下段部からなる。アクチュエータを下段に搭載し、動力を分離させることにより、上段内部の清潔性が考慮された設計になっている。汚れはローラの回転によって除去される(Fig. 8(c))。手術中の器具洗浄は器械出し看護師によって 1 つ 1 つ手作業によって行なわれているが、電気メスなどに強固にこびり付いている炭化した血液は除去するのが時として困難であり、洗浄のため手術が一時中断することも稀ではない。したがってすばやく汚れを除去できる器具洗浄機は、器械出し看護師の代替となる SNR に導入されるべき機能の 1 つであるといえる。

4.2 ASULA 機構概要

Fig. 9 に開発した SNR 2 号機 ASULA を、Table 4 にその仕様を示した。ASULA は単体のロボットとして設計した。したがって 2 台の SNR 1 号機が担っていた役割を 1 台のロボットが担当する。アームは 1 本当たり 4 自由度の機構

Fig. 9 Second SNR (ASULA)

Table 4 Specifications of ASULA

ASULA	
Size [mm] (Height×Width×Depth)	330×500×1000 (Min Depth Range)
Shoulder Joint Angle [deg]	90
Elbow Rotating Angle [deg]	180
Body Rotating Angle [deg]	360
Gripper Range [mm]	0~35
Body Stroke [mm]	400
Weight [kg]	60
Degree of Freedom	10

とした。

胴体部分には回転機構を搭載している。これによって SNR の周りに置かれた種々の器具を取り上げるために腕を水平に回転させることができる。さらに SNR 1 号機と同様に胴体内にリニアアクチュエータを搭載したことから、胴体高度を自由に变化させることによって、執刀医の手元の高さに適応することも可能とした。

肩部には遊星ギヤ列を配列し、上腕部に設置した伝達機構により、肩部動力を肘部まで伝える 2 関節駆動とすることにより、ロボットが単体になることで縮小が懸念される最大作業領域の拡大を図った。

手首は差動ギヤ列を配列することにより、捻りおよび屈曲の各動作を行なえる機構とし、器具を手渡す際の手首の角度、方向に多様性をもたせることで、執刀医が受け取りやすい位置、向きに器具提供をすることを可能とした。

ハンド部においては、歯数の異なる平歯車やウォームギヤを用いることでモータの回転を約 10.9 倍に減速させ指部の把持力を生み出している。清潔を保つためにハンド部のモータはカバー内部に設置しており、その動力はウォームギヤとウォームホイールにて外部に取り出し、指部分の平行リンク機構を駆動させ、器具を把持している。この動力伝達の分離は滅菌カバーなどによる滅菌処理を行なう際の清潔領域と非清潔領域を明確にし、滅菌に対応するための設計である。

4.3 ASULA のユーザインタフェース

ASULA のユーザインタフェースとして不特定話者音声認識・発話機能の導入を行なった。音声認識・発話機能は ASIMO などのヒューマノイドロボットにも搭載されており、人間がロボットから実環境で何らかの入出力を得るためには、欠かせないユーザインタフェースの 1 つであるといえる。SNR 1 号機ではフットスイッチを用いたが、実際の手術現場において執刀医がフットスイッチによってロボット操作を行なうことは、執刀医が両手先の手技に集中し、視線を絶えず術野に向けていることを考慮すると、余計な負担になり、手技の乱れや手術リズムを崩す原因ともなり得る。現状の手術室においても、執刀医側から器具を要求する際には、執刀医が器具の名前をいうことによって器械出し看護師が器具を手渡す作業が通例となっている。したがって現状の

Table 5 The voice answering database

Surgeon	Scrub Nurse
メス、電メス、電気メス	電気メスです。
吸引、吸引管、アスピレータ	血液吸引管です。
ミツアナ結紮、結紮	結紮鉗子です。
マギー	マギー鉗子です。
片開き	中空片開き鉗子です。
両開き	中空両開き鉗子です。
止血、ペアン	止血鉗子です。
おじぎ	おじぎ鉗子です。
生食、生理食塩水	生理食塩水です。
はい、ありがとう、離して、OK	離します。
違う、それじゃない、これじゃない	間違えました。
おい、なにやっているんだ、 いい加減にしろ	ごめんなさい。
すばらしい、すごい、よくできた	ありがとうございます。
難しいな	頑張ってください。
終わり、お疲れさん、お疲れ様でした	お疲れ様でした。

Table 6 Unrecognized words

Words	Reason for Being Unrecognized Words
は、ふ、す、あ、い、う、え、お	Noises and admiration words might be recognized as a motion instruction signal.
かめら、ひいて、もっと、 右、左、上、下、 手前、ズーム、	Words that is said to a camera assistant from a surgeon might be recognized.
傾けて、ベッド、頭、 右、左、上、下	Words that is said to a clinical engineer from a surgeon might be recognized.

SNR に関して実際の臨床における使用を考慮すると、ユーザインタフェースとしては音声認識を用いたほうが手術進行の妨げになりにくいと考えられる。

音声認識を行なうにあたって、認識すべき言葉を言語データベースとして集積した。音声認識を使用した場合、誤認識による誤った器具の提供は、手術の時間を長引かせ、執刀医の手術リズムを乱すなど、手術全体に悪影響を及ぼしかねない。したがって手術室という特殊な環境で任意に飛び交っている言葉を、正確に判別できるデータベースを作成することが認識率を左右する重要な点である。特に考慮すべきことは、不特定話者に対応できる言葉の抽出、認識する必要がないにもかかわらず頻繁に使用され、誤認識の可能性が懸念される言葉の抽出、多様な器具名の呼称への対応、などが挙げられる。今回はこれらの点に配慮し、手術室で撮影したデジタルビデオカメラの映像を元に認識率を向上させるための言語データベースを作成した (Table 5)。誤認識を起こしかねない感嘆語、擬音語などの言葉は認識判定外として設定した (Table 6)。執刀医の音声は鋭指向性マイクより認識され、執刀医がデータベースに含まれる単語を発言すると、それに応じてロボットが駆動するプログラムとした。これにより、

通常状態と同様の感覚で手技を行なうことが可能となる。

今回作成した言語データベースを実用するために音声認識ソフト (Voice Key ver 1.4^(注1)) を用いた。音声認識率は9割を超えたが、100%ではないということは、万一誤認識された場合、誤った器具が提供され、そのたびに手術の進行を妨げ、医師の手術ペースを乱すことになる。これは手術全体の質の悪化にもつながりかねない。したがって今後データベースの改良や、音声データベースとの併用を検討し、誤認識率を削減する必要がある。

音声の発話は、主としてロボット起動時、器具提供時、外科医側からの問いかけがあったときにそれに対する応答として行なわれる。集積した手術中の執刀医-器械出し看護師間の会話を元に、執刀医-SNR 間における応答・返答パターンを設定した (Table 5)。音源は器械出し看護師の代役として学生の音声を録音したものを使用した。

5. ASULA の基本動作検証

5.1 検証方法

動作検証として、ASULA の駆動の様子をデジタルビデオカメラにて録画し、(株)DKH 社製 Frame DIAS 2 を用いて動作計測をすることで基本動作の検証、および作業領域の測定を行なった。

5.2 結果と考察

Fig. 10 に ASULA の作業領域を示した。アームを伸ばした状態、および腕を縮めた際における水平作業領域は、頭部を中心としてそれぞれ半径 660 [mm]、500 [mm] の円内であることを確認した。これにより SNR 1 号機の最小駆動領域 1.68 [m²] から 0.31 [m²] への大幅な減少が実現され、要求仕様であった作業領域の縮小が確認できた (Fig. 11 (a), (b))。これにより手術室内の計測機器、および人との干渉の危険性の低減が期待される。アームのストロークは最大で 410 [mm] であり、器具を執刀医の手元に提供するには十分な長さであるといえる。ハンド部の垂直作業領域については胴体内のリニアアクチュエータのストロークが 400 [mm] であるため、600~1000 [mm] であることも確認された。ASULA は手術室で作業を行なう器械出し看護師に代わって導入されるものとして開発されていることから、配置位置に関しても器械出し看護師の立ち位置に代わって設置されることが適当である。そこで、Fig. 11(c) に示したように、想定している設置位置からアームを伸ばすと、余裕をもって執刀医の手元まで器具を把持しながらアプローチすることができる。そのため、執刀医自らが器具を受け取るために意識的に手を後方に伸ばしたり、後方を振り返る必要もなくなるため、円滑な器具交換動作が期待できる。

手渡す動作に関しては、胴体部の回転、肩部、手首の4つのモータを同期制御することにより、胴体部が回転すると同時にアームを伸縮することができる。ハンド部に把持され

Fig. 10 Working space of ASULA

Fig. 11 Comparison of working space first SNR and ASULA. (a) Working space of the first SNR (b) Working space of ASULA (c) View from overhead

た器具は5自由度のアクチュエータの使用により、清潔が維持されなければならない器具先端が縦横に動きをすることなく、執刀医の手元にスムーズに提供することができ、器具が周囲の手術機器や人と干渉する危険性は低減される。

指の開閉時間は 615 [msec] であった。この結果は、器具を離す動作に関しては問題がないと考えられるが、器具をつかむときは瞬時の動作ができないため、SNR 1 号機で用いた空圧アクチュエータ (開閉時間 23.0 [msec]) を比較すると若干ではあるが動作時間のロスが生ずることになる。今後把持機能に関する重点的な検証を行ない、最善の器具交換動作を追求する必要がある。

6. 結 論

本稿では世界的に不足している手術室器械出し看護師の代替となり、腹腔鏡下手術で使用されることを目的として開発した SNR 1 号機、および SNR 2 号機 ASULA について報告した。SNR 1 号機の開発にあたって、手術室における動作計測システムを構築し、執刀医・器械出し看護師の動作解析を行なった。解析結果を踏まえた上で、SNR 1 号機を製作した。さらに SNR 1 号機の動作検証結果を元に、SNR 2

(注1) <http://www8.plala.or.jp/pegasus/>

号機, ASULA の設計・製作を行なった。動作検証の結果, SNR 1号機の最小駆動領域 $1.68 [m^2]$ から $0.31 [m^2]$ の大幅な減少が実現された。ASULA のユーザインタフェースとして導入した不特定話者音声認識・発話機能に関しては, 手術室における執刀医・器械出し看護師間の会話を元に, 応答・返答データベースを作成し, 音声認識における認識率の向上を図った。

以上のように, 執刀医との間で手術器具の交換を行なうロボットを開発するにあたって, SNR の最適な仕様の的確な判断, また音声認識データベースの構築をするためには, 手術室における動作計測, 各種分析データが非常に大きくかかっている。したがって本稿で述べた SNR 開発は, 計測技術と設計技術との融合によって, 医療分野への貢献を最大限に追求するシステムインテグレーションであるといえる。

謝辞 本研究は東京電機大学「21世紀COEプロジェクト」の研究助成による。

参考文献

- 1) 佐久間一郎: 手術支援ロボット: 工学的立場から, Journal of Computer Aided Surgery, 5-2, 51/56 (2003)
- 2) 橋爪誠: 手術支援ロボット: 臨床的立場から, Journal of Computer Aided Surgery, 5-2, 57/60 (2003)
- 3) 菅野伸彦: 手術支援ロボット: 臨床的立場から—骨関節手術支援ロボット—, Journal of Computer Aided Surgery, 5-2, 61/64 (2003)
- 4) 佐藤, 中本, 中島, 榎本, 菅野, 橋爪, 米延, 中村, 田村: 手術支援画像: 工学的立場から—手術支援のための画像および空間情報統合システム—, Journal of Computer Aided Surgery, 5-2, 65-68 (2003)
- 5) 森健策: 手術支援画像: 工学的立場から—仮想化内視鏡と手術支援画像生成—, Journal of Computer Aided Surgery, 5-2, 69/74 (2003)
- 6) 伊関, 村垣, 杉浦, 南部, 中村, 高倉: 手術支援画像: 臨床的立場から—診断と治療の融合に基づくコンピュータ外科の現状—, Journal of Computer Aided Surgery, 5-2, 75/80 (2003)
- 7) R. H. Taylor and D. Stoianovici: Medical Robotics in Computer-Integrated Surgery, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 19-5, 765/781 (2003)
- 8) D. Hashimoto: Advanced Techniques in Gasless Laparoscopic Surgery (1995)
- 9) G. S. Guthart and J. K. Salisbury, Jr.: The Intuitive™ Telesurgery System: Overview and Application, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 618/621 (2000)
- 10) 安永, 橋爪, 奥山, 起田, 小林, 小西, 土肥, 佐久間, 島田, 前原, 宮本: 内視鏡把持装置 NaviotTM 58 臨床適用例の検討, 第12回日本コンピュータ外科学会大会論文集, 137/138 (2003)
- 11) FL. Bower, C. McCullough: Nurse Shortage or Nursing Shortage: Have We Missed the Real Problem?, Nurs Econ. 2004 Jul-Aug, 22(4): 200-3, 175 (2004)
- 12) 世界的な看護師不足: 問題と行動の概観, <http://www.nurse.or.jp/kokusai/icn/2005kangosifusoku.pdf>
- 13) F. Miyawaki, K. Masamune, S. Suzuki, K. Yoshimitsu and J. Vain: Scrub Nurse Robot System—Intraoperative Motion Analysis of a Scrub Nurse and Timed-Automata-Based Model for Surgery, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52-5, 1227/1235 (2005)
- 14) Robotic Surgical Tech., Inc., <http://www.roboticsurgicaltech.com/index.html>
- 15) 手術支援ロボット—鉗子の自動手渡しアシストロボット—, <http://www.japsam.or.jp/japsam/jigyo/robo01.pdf>
- 16) 新太喜治: 酸化エチレンガス滅菌, 小林寛伊編, 感染制御学, 第1版, 88/92, へるす出版 (1996)
- 17) 細淵和成: プラズマ滅菌, 小林寛伊編, 感染制御学, 第1版, 108/113, へるす出版 (1996)
- 18) K. Yoshimitsu, T. Tanaka, K. Ohnuma, F. Miyawaki, D. Hashimoto and K. Masamune: Prototype Development of Scrub Nurse Robot for Laparoscopic Surgery, Proceedings of CARS 2005, 845/850 (2005)
- 19) 西, 宮脇, 大沼, 吉光, 山崎, 正宗: 腹腔鏡下手術支援用 Scrub Nurse Robot におけるハンド機構の開発, 日本機械学会関東支部第1回埼玉ブロック大会講演論文集, 63/64 (2005)
- 20) 吉光, 正宗, 田中, 西, 古木, 山崎, 大沼, 橋本, 宮脇: 腹腔鏡下手術支援用 Scrub Nurse Robot の動作検証, SICE SI 2005, 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概要集, 332 (2005)

[著者紹介]

吉光 喜太郎

2004年東京電機大学理工学部生命工学科卒業。2006年同大学院理工学研究科生命工学専攻修了。同年同大学院先端科学技術研究科先端技術創成専攻博士課程に進学。2006年より日本学術振興会特別研究員, 現在に至る。腹腔鏡下手術支援用 Scrub Nurse Robot の開発研究を通じて医用工学の研究に従事。

宮脇 富士夫

1979年東京大学医学部医学科卒業。88年東京女子医科大学附属第二病院心臓血管外科助手。93年国立循環器病センター研究所・実験治療開発部実験外科室長, 日本胸部外科学会指導医。99年東京電機大学理工学部教授, 現在に至る。医学博士。専門は心臓血管外科, 医用工学など。American Heart Association, 日本人工臓器学会, European Society for Artificial Organs, 日本胸部外科学会, 日本生体医工学会, ライフサポート学会, 日本循環器学会, 日本外科学会, 日本脈管学会, 日本バイオレオロジー学会, 日本臨床生理学学会, 日本移植学会などの会員。

貞 弘 晃 宜 (正会員)

2005年東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻博士課程修了。同年東京電機大学21世紀COEプロジェクト推進室助手, 現在に至る。ロボットの運動制御の研究に従事。博士(工学)。日本機械学会, 日本コンピュータ外科学会, IEEEなどの会員。

大沼 健太郎

2002年東京電機大学理工学部応用電子工学科(現, 電子情報工学科)卒業。2004年同大学院理工学研究科応用電子工学専攻修了。同大学院先端科学技術研究科先端技術創成専攻博士課程を経て, 2007年大阪大学大学院医学系研究科特任助教, 現在に至る。修士(工学)。医用工学の研究に従事。

橋本 大 定

1968年東京大学医学部医学科卒業。外科医として三井記念病院、小川日赤病院、東京警察病院に勤務。東京大学病理学教室、浜松医科大学第1外科を経て84年東京大学第2外科講師、2000年埼玉医科大学総合医療センター外科教授。専門は消化器外科学で、吊り上げ手術研究会、ミニラバ研究会、小切開・鏡視下手術研究会の代表世話人として、“安全な内視鏡下手術”の構築に貢献。外科学会、消化器病学会、大腸肛門病学会評議員、レーザー医学会、日本コンピュータ外科学会、日本生体医工学会、ELSAの理事。

正 宗 賢

1995年東京大学大学院工学系研究科修士課程卒業。95年同大学助手、2000年東京電機大学理工学部講師、2004年同大学助教授、2005年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻助教授、2007年准教授、現在に至る。博士(工学)。専門は医用精密工学で、医用システム、医療用ロボットの研究に従事。日本コンピュータ外科学会、ライフサポート学会、日本生体医工学会、日本機械学会、日本ロボット学会などの会員。