


Review

# Roboticky asistovaná laparoskopická chirurgie: Současný stav a směry budoucího vývoje

Sally Kathryn Longmore <sup>1,\*</sup> , Ganesh Naik <sup>1</sup>  and Gaetano D. Gargiulo <sup>1,2,3,4</sup> 

<sup>1</sup> MARCS Institute for Brain, Behaviour and Development, Western Sydney University, Milperra, NSW 2560, Australia; ganesh.naik@westernsydney.edu.au (G.N.); g.gargiulo@westernsydney.edu.au (G.D.G.)

<sup>2</sup> School of Engineering, Western Sydney University, Kingswood, NSW 2747, Australia

<sup>3</sup> Translational Health Research Institute, Western Sydney University, Campbelltown, NSW 2560, Australia

<sup>4</sup> Ingham Institute, Liverpool, NSW 2170, Australia

\* Correspondence: s.longmore@westernsydney.edu.au

Received: 13 March 2020; Accepted: 22 May 2020; Published: 27 May 2020



**Abstract:** Just as laparoscopic surgery provided a giant leap in safety and recovery for patients over open surgery methods, robotic-assisted surgery (RAS) is doing the same to laparoscopic surgery. The first laparoscopic-RAS systems to be commercialized were the Intuitive Surgical, Inc. (Sunnyvale, CA, USA) da Vinci and the Computer Motion Zeus. These systems were similar in many aspects, which led to a patent dispute between the two companies. Before the dispute was settled in court, Intuitive Surgical bought Computer Motion, and thus owned critical patents for laparoscopic-RAS. Recently, the patents held by Intuitive Surgical have begun to expire, leading to many new laparoscopic-RAS systems being developed and entering the market. In this study, we review the newly commercialized and prototype laparoscopic-RAS systems. We compare the features of the imaging and display technology, surgeons console and patient cart of the reviewed RAS systems. We also briefly discuss the future directions of laparoscopic-RAS surgery. With new laparoscopic-RAS systems now commercially available we should see RAS being adopted more widely in surgical interventions and costs of procedures using RAS to decrease in the near future.

**Keywords:** robotic-assisted surgery; laparoscopic; 3D stereoscopic imaging; haptic feedback; tremor removal; patents; hand controllers; end effectors

## 1. Introduction

In the year 1986, a team using a modified UNIMATION PUMA 200 programmable industrial robotic arm performed the very first robotic assisted surgery (RAS). The surgical procedure used the PUMA 200 robot to obtain a biopsy from a patient with a suspected brain lesion [1,2]. Since this first successful use of a robot to assist in a surgical procedure, several RAS systems have been developed, but only few of those systems have been commercialized.

The first two laparoscopic RAS systems to be commercialized were the Intuitive Surgical Inc. (Sunnyvale, CA, USA) da Vinci and the Computer Motion Zeus. The da Vinci RAS system was the first to receive US Food and Drug Administration (FDA) approval in 2000, while the Zeus system received FDA approval the following year [2,3]. Intuitive Surgical Inc. and Computer Motion were both awarded important patents related to their robots, resulting in both going to court to settle an ongoing patent dispute. Before the patent dispute was settled in court, Intuitive Surgical bought out Computer Motion including the disputed patents, thus ending the patent battle. After purchasing Computer Motion, Intuitive Surgical discontinued sale of the Zeus RAS system [3–5].

As a result of Intuitive Surgical's purchase of Computer Motion, many of the patents relating to laparoscopic RAS were owned by Intuitive Surgical up until recently when they began to expire.

Many laparoscopic RAS systems were being developed waiting for the patents to expire, resulting in new robots obtaining FDA approval in the past few years. One of the first to gain FDA approval was the Asensus Surgical (Morrisville, North Carolina) Senhance RAS system [6]. Senhance is a multi-arm RAS system similar to da Vinci in concept but with some key differences. Unlike the da Vinci RAS system, Senhance uses eye tracking for control of the endoscope, has haptic feedback and individual patient carts each hosting a single robotic arm [7–14]. The CMR Surgical (Cambridge, UK) Versius RAS system is currently awaiting FDA approval, however, has Conformité Européenne (CE) approval [6]. Meanwhile some other systems such as the Avatera RAS system by avateramedical GmbH (Jena, Germany) have only obtained CE certification [15]. Meanwhile, other robots have received approval in other countries, such as the REVO-I RAS system by Revo Surgical Solutions (Seoul, Korea) [6]. There are other robots in prototype stages of development undergoing tests in porcine models, cadavers and clinical trials.

This review will look at the RAS systems that are currently commercialized, those that are currently undergoing clinical testing for approval and those in late prototype stages of development. The focus of this review will be robots designed for laparoscopic surgical procedures. This review will take a sub-system approach to comparing and contrasting the RAS systems, beginning with the subsystems of the surgeons console and culminating in the sub-systems of the patient interface.

## 2. Literature Review Methods

Initially, we performed general searches using PubMed Central and Google to collate a list of potential candidate RAS systems for inclusion in the literature review. We then narrowed the inclusion criteria to include only RAS systems that have an endoscope or another internal imaging device for visualization of the surgical environment; have the option to be tele-operated from a remote terminal (i.e., no physical or mechanical connection between the surgeon and the instruments); and the RAS system must be designed for laparoscopic surgery and utilize one or more incision ports through which instruments can maneuver inside the patient's body. Finally, the RAS system must have already been commercialized, or be intended for commercialization in the foreseeable future.

For each included RAS system, a search was performed across eight medically related databases (Cochrane Library, Google Scholar, Ovid, ProQuest Central, PubMed, Science Direct, Scopus and Web of Science) as shown in Table 1. A Boolean search term was used for each RAS system in the format "Robot" AND "Surgery" AND "RAS System Name", for example "Robot" AND "Surgery" AND "da Vinci XI" (Table 1). Where a RAS system has been known by several names, all known names of the system were used in the Boolean search term.

**Tabulka č 1** Výsledky pro jednotlivé systémy roboticky asistované chirurgie na základě studia literatury. Počty článků nalezených jednotlivými internetovými vyhledávacími. Výsledky jsou uspořádány podle střední hodnoty publikací v jednotlivých databázích.

Manufacturer	Model	Science Direct	Ovid	Web of Science	Scopus	PubMed	Cochrane Library	Google Scholar	ProQuest Central	Mean	Search Term
avateramedical	Avatera	4	2	1	1	1	0	22	3	4	"Robot" AND "Surgery" AND "Avatera"
Intuitive Surgical	da Vinci	4617	2858	1899	2652	1413	276	26,400	2513	5329	"Robot" AND "Surgery" AND "da Vinci"
Intuitive Surgical	da Vinci S	386	294	120	154	87	22	2640	302	501	"Robot" AND "Surgery" AND "da Vinci S"
Intuitive Surgical	da Vinci SI	530	330	90	258	83	40	2850	358	568	"Robot" AND "Surgery" AND "da Vinci SI"
Intuitive Surgical	da Vinci SP	58	32	20	28	13	0	252	14	52	"Robot" AND "Surgery" AND "da Vinci SP"
Intuitive Surgical	da Vinci XI	249	136	83	186	78	15	1530	146	303	"Robot" AND "Surgery" AND "da Vinci XI"
Medtronic	Hugo	706	106	3	8	32	1	6320	357	942	"Robot" AND "Surgery" AND ("Einstein" OR "Hugo")
DLR	MiroSurge	20	8	6	15	1	0	392	34	60	"Robot" AND "Surgery" AND "MiroSurge"
Revo Surgical Solutions	Revo	6	11	6	10	6	0	62	9	14	"Robot" AND "Surgery" AND "Revo-I"
TransEnterix	Senhance <sup>A</sup>	51	26	15	28	16	2	335	32	63	"Robot" AND "Surgery" AND ("Senhance" OR "ALF-X")
Titan Medical	SPORT Surgical System	19	11	2	4	20	0	130	19	26	"Robot" AND "Surgery" AND ("SPORT Surgical System" OR "Single Port Orifice Robotic Technology")
ARKANES	SPRINT <sup>C</sup>	102	34	5	6	3	0	1200	45	174	"Robot" AND "Surgery" AND "SPRINT"
CMR Surgical <sup>B</sup>	Versius	8	7	1	7	1	0	70	6	13	"Robot" AND "Surgery" AND "Versius"

(A) Senhance se původně jmenoval Telelap ALF-X [8,13]. (B) SPRINT = Single-Port laparoscopy blmaNual robot. (C) CMR Surgical se původně nazýval Cambridge Medical.

### 3. Výsledky šetření

Výsledky srovnání na základě publikovaných informací jsou prezentovány v tabulce č. 1. Nejvíce publikačních výsledků měl robotický systém da Vinci od společnosti Intuitive Surgical (tabulka č. 1). Vzhledem k tomu, že robotický systém da Vinci společnosti Intuitive Surgical dal i základ názvosloví je možné, že výsledky u novějších systémů vedly k nafouknutí počtu publikací týkajících se robotických systémů da Vinci, jež byly první.

Robotický systém da Vinci společnosti Intuitive Surgical zaznamenal největší počet článků se střední hodnotou 5329 publikací napříč všemi databázemi. Druhým robotickým systémem s nejvyšší střední hodnotou publikací v prohledávaných databázích byl systém Hugo společnosti Medtronic (942 publikací).

### 4. Robotické systémy v chirurgii (RAS)

Systémy, jež jsou předmětem tohoto srovnání zahrnují ty, které jsou již komerčně dostupné nebo budou v dohledné době uvedeny na trh. Prvním z těchto systémů je da Vinci. Robotický systém da Vinci společnosti Intuitive Surgical Inc. byl jedním ze dvou laparoskopických robotických systémů, který byl komerčně nabízen pro využití na operačních sálech. Tím druhým byl systém Zeus od Computer Motion.

Systém da Vinci RAS vytvořil jakýsi etalon, kterým se dnes mnohé další robotické systémy řídí, tedy samostatné pracoviště operátora tzv. operační konzole a jeden patientský vozík, který nese robotická ramena. [14,16–19]. V případě konzole u systému da Vinci operátor sedí a naklání se do okulárů s 3D stereoskopickým zobrazením, kde je vizualizován chirurgický zákrok. Operátor má dva ruční ovladače a řadu nožních spínačů, jimiž ovládá robotická ramena, instrumentárium a endoskop [14,16–19]. Před nedávnem společnost Intuitive Surgical představila systém da Vinci SP, který je navržen pro tzv. natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES) [20].

Robot Revo-I od společnosti Revo Surgical Solutions a systém Avatera od společnosti avatera medical mají podobné uspořádání jako da Vinci [15,17,21–26]. Oba tyto systémy mají vozík se čtyřmi robotickými rameny, 3D stereoskopický monitor, ruční ovladače a nožní spínače [15,17,21–26]. Zatímco systém da Vinci se komerčně využívá již dvacet let, systémy Revo-I a Avatera jsou schválené a komerčně dostupné jen na několika málo trzích [6,15,26].

Ostatní roboty zahrnuté v tomto přehledu využívají odlišný přístup oproti výše zmíněným systémům. Systémy MiroSurge, Hugo, Senhance a Versius používají pro zobrazení operačního pole místo dříve zmíněného stereoskopického 3D zobrazení plochý polarizační 3D monitor. [6,8,9,11–13,27–44]. Každý z nich také používá samostatné patientské vozíky s jedním robotickým ramenem. [6,8,9,11–13,27–44].

Systémy SPORT Surgical System, SPRINT a další robotické systémy určené pro NOTES jsou podobné systému da Vinci SP. Tyto robotické systémy se liší od systému da Vinci SP tím, že používají plochou polarizační obrazovku. Všechny systémy NOTES používají pouze jedno robotické rameno a do těla se zavádějí přirozenými tělními otvory. Nástroje mají navíc ještě další kloubové spoje oproti jiným robotickým systémům, čímž se zvyšuje jejich zručnost nezbytná při operačních zákrocích [33–35,40–42,44,45].

### 5. Zobrazovací technologie a obrazovky

Zobrazovací technologie a obrazovky hrají u robotických systémů klíčivou roli, protože poskytují operátorovi nutnou zpětnou vazbu. Před zavedením taktilní a haptické zpětné vazby představovala zobrazovací technologie a displej jediné rozhraní, kde operátor získával zpětnou vazbu z prostředí operačního výkonu. K odhadu pozice koncových efektorů v 3D prostoru se používá vizuální zpětná vazba v podobě stínů, stereoskopické parallaxe a binokulárního vidění, zatímco deformace tkání slouží k odhadu síly nutné k uchopu a pro průnik tkáněmi. [46,47].

Existují různé přístupy k zobrazení operačního pole. Zobrazovací technologie se skládá z dvourozměrných (2D) a trojrozměrných (3D) endoskopických snímacích zařízení, nyní se však používají výhradně 3D endoskopická snímací zařízení [13,19,39,48–51]. Výstupy z nich jdou buď do plochých 2D nebo 3D plochých obrazovek a nebo do 2D či 3D stereoskopických monitorů.

Některé systémy nabízejí možnost zvolit si zobrazení v 2D nebo 3D [13,19,39,48–51].

Stereoskopické 3D systémy se používají již od počátku komerčního zavedení systému da Vinci [16,19,39,48–51]. Třírozměrné stereoskopické systémy používají dva samostatné monitory, každý pro jedno oko [16,18,52]. Existuje několik robotických systémů, které využívají 3D stereoskopické vidění pro zobrazení operačního pole, což mají všechny varianty systému da Vinci, Revo-I a Avatera (tabulka 2) [15,16,18,19,22,39,48–52]. Obrazovky jsou umístěny v blízkosti oka, podobně jako je tomu u brýlí pro sledování virtuální reality. Obraz si uživatel může často upravit buď tím, že posune obrazovku nebo nastaví rozteč mezi okuláry podle vzdálenosti očí. [18]. U robotických systémů je systém stereoskopického 3D vidění často zabudován do uzavřené konzole a operátor se naklání nad okuláry. [15,16,18,19,22,39,48–52]. Zatímco komerční robotické systémy používají zpravidla vlastní 3D stereoskopické systémy, některé experimentální systémy již používají běžně dostupné 3D zobrazovací systémy používané pro počítačové hry jako je například Oculus Rift a HTC Vive [19].

Další typ 3D zobrazení, který se často používá jak u komerčních, tak experimentálních robotických systémů jsou 3D polarizační ploché monitory. Většina systémů, které nepoužívají 3D stereoskopické vidění používá 3D polarizační ploché monitory (tabulka 2), například Senhance a Versius [6,8,9,11,12,23,26–28,32,34,36,39,47,53–59]. Ploché obrazovky jsou u těchto systémů podobné plochým 3D obrazovkám u televizorů používaných v domácnostech, často se dokonce v těchto systémech i jejich komerční varianty používají. 3D ploché monitory zpravidla jsou v kvalitě HD rozlišení (1080p) [6,14,16,17,23,28,32,33,43,47,58,60–62]. Aby operátor mohl využít výhody zobrazení operačního pole v 3D, musí si nasadit polarizační brýle [6,12–14,28–32,34,37–39,43,63]. Plochá obrazovka použitím optické masky promítá dva obrazy, každý pro jedno oko [52]. Panel obrazovky má na sobě polarizační filtr, který polarizuje světlo v úhlu 90° pro každý obraz horizontálně spojený optickou maskou [52]. Čočky v brýlích, které má operátor nasazené, jsou vůči sobě polarizované v úhlu 90°, takže každé oko vidí jen ten obraz, který je mu určen. [52].

Každý systém 3D vidění má své výhody i nevýhody. Stereoskopický systém 3D nabízí operátorovi věrnější obraz, protože každé oko sleduje svoji vlastní obrazovku [52]. Oproti tomu 3D polarizační obrazovky mají obecně horizontální rozlišení poloviční zatímco vertikální zůstává beze změny [52]. Obraz v případě 3D stereoskopie je také mnohem jasnější než u technologie polarizační 3D ploché obrazovky. Polarizační čočky u polarizačních monitorů eliminují část světla vstupujícího z obrazovky do oka [26]. Hlavní nevýhodou systémů stereoskopického 3D vidění je to, že operátor má hlavu zabořenou do nástavce s okuláry pro 3D vidění a je tak izolován od operačního týmu. Technologie 3D polarizačních obrazovek ponechává chirurgovu hlavu nezakrytou a on tak vidí operační sál, není tolik izolován, má zachováno periferní vidění a je i lepší komunikace s operačním týmem [26]. Obě technologie obrazovek mají jedno společné, což je pořízení stereoskopického obrazu buď samotným počítačem řízeným endoskopem nebo v případě některých robotických systémů s jedním vstupem (single port) pomocí integrované stereoskopické kamery [59,64,65].

**Tabulka 2.** Zobrazovací technologie a monitory u jednotlivých robotických systémů.

Robot	2D	3D	3DS	Endoscope Control	Ref.
Avatera	A		B	D	[15,26]
da Vinci (all versions)	A		B	D	[16,18,19,39,47–51,66]
Hugo	A	C		N/A	[38]
MiroSurge		C		N/A	[29,39,63]
Revo-I			B	N/A	[21,22,24]
Senhance	B	C		♦	[8,9,11–13,27,36,37,39,53–57]
SPORT Surgical System		C		N/A	[33,35,39,42,44]
SPRINT		C		N/A	[30,31,34,40,41]
Versius		C		N/A	[6,32,37,39,43]

2D dvojrozměrný monitor 3D trojrozměrná plochá obrazovka 3DS trojrozměrná stereoskopická obrazovka N/A v době zpracování přehledu nebyly informace k dispozici A = druhá 2D plochá obrazovka B = Robotický systém obsahuje daný prvek C = používá 3D polarizační brýle D = Nožní spínač a ruční ovladače E = sledování pohybu očí



## 6. Operační konzole

Operační konzole je primárním rozhraním mezi operátorem a pacientem, její konstrukce musí být dobře navržena, protože se jedná o kritickou část, na níž závisí bezpečný výkon chirurgických zákroků (obr. 1). Operátor musí znát ovládací prvky konzole, jejich používání musí být snadné a musí mít zabudované bezpečnostní mechanismy zabraňující nechtěným pohybům koncových efektorů. Konzole by měla mít vedle vysoce kvalitních systémů pro 3D vidění, které byly popsány v předchozí části, i kvalitní ergonomický design, aby operátor mohl provádět dlouhé a komplikované chirurgické zákroky s minimální ergonomickou nepohodou a únavou. Stejně jako u systémů vidění, existují i různé přístupy k řešení konzole.

### 6.1. V sedě nebo ve stoje

V laparoskopické chirurgii je zpravidla nutné, aby chirurg při operaci stál u pacienta, manipuloval laparoskopickými nástroji a současně na monitoru viděl situaci uvnitř pacientova těla. Se zavedením robotických systémů je operátor od pacienta vzdálen a sedí u vzdálené konzole umístěné v operačním sále. Přesto se některé nové robotické systémy vrací k možnosti, kdy operátor může při zákroku stát.

První velký rozdíl v konstrukčním řešení robotických systémů spočívá v tom, zda operátor pracuje v sedě či ve stoje (tabulka 3, obr. 1). Obojí, jak práce v sedě, tak ve stoje, mají na operačním sále své výhody a nevýhody. Většina robotických systémů má konzole navržené pro práci v sedě [8,9,11,14,18,28,33,38,63]. Avšak Versius dává operátorovi možnost si vybrat, zda bude u konzole sedět nebo stát. [32,37].

Konzole se sezením má oproti konzoli určené ke stání řadu výhod. Konzole pro práci v sedě snižuje únavu operátora, zejména pokud se jedná o několikahodinové operace. V případě systémů Avatera, Senhance, da Vinci a SPORT je ještě možnost si opřít ruce o opěrky [15,18,44]. Konzole pro stání nabízejí operátorovi možnost pracovat ve stoje, tak jak je u klasické laparoskopické operace zvyklý. Kromě toho konzole pro práci ve stoje může vytvářet pocit, že operátor není tolik izolován od ostatních členů týmu a umožňuje i lepší komunikaci. Ale pokud chirurg musí při operaci celou dobu stát, může pociťovat zvýšenou míru únavy oproti práci v sedě.

### 6.2. Ruční ovladače

Ruční ovladače jsou primárním vstupním rozhraním a operátorovi umožňují kromě samotné manipulace s koncovými efekty i jejich navádění na pozice v 3D prostředí. Ruční ovladače musí zajistit maximálně šikové manipulace a současně být ergonomické, aby operátor mohl provádět dlouhé a jemné zákroky bezpečným způsobem.

Hlavním rozdílným prvkem u konzol robotických systémů je způsob řešení ručních ovladačů (Table 3). Při vývoji systému da Vinci byla snaha navrhnout ovladače tak, aby simulovaly pohyb koncových efektorů místo aby napodobovaly ruční spínače stávajících laparoskopických nástrojů [11,18]. Prsty se zasouvaly do ok na ručních ovladačích a palec s ukazovákem se pohybovaly, jako by držely nůžky nebo pinzetu koncových efektorů [18]. Pohyb rukou ve třech stupních volnosti (DoF) ovládá otáčení nástrojů koncových efektorů [18]. To má výhodu, že je napodobován pohyb a úchopy koncových efektorů, nicméně je to jiné oproti ovladačům (spínačům) u klasického laparoskopického instrumentária. Některé studie ukazují, že ruční ovladače systému da Vinci zvyšují časovou náročnost školení chirurgů zvyklých na tradiční laparoskopickou chirurgii a mohou dokonce zvyšovat i míru rizika u pacientů při roboticky asistovaných operacích. Jiné robotické systémy (Avatera, MiroSurge, SPORT) používají podobné ovládací rozhraní jako da Vinci [15,38,42].

Senhance používá ruční ovladače podobné klasickým ovladačům laparoskopického instrumentária [8,11,13]. Používání známých ovladačů ukázalo zkrácení doby nutné pro zaškolení operátorů, kteří přecházejí z tradičních laparoskopických technik na roboticky asistovanou chirurgii. Navíc to může pomoci v případě, kdy chirurg musí během operace přejít z roboticky asistovaného postupu na laparoskopickou chirurgii, protože používané ovladače si jsou podobné. [55].

Některé novější systémy jako například Versius mají ovladače podobné ovladačům u virtuálních počítačových her [6,12,32,37,39]. Ovladače mají rukojeť, jejíž jedna část má oko pro ukazovák, kterým se ovládá uchopování a řezání prováděné koncovými efekty [37]. Na horní části ručního ovladače je řada tlačítek a malých joysticků [37]. Joysticky operátorovi umožňují upravit pozici kamery,

přiblížení (zoom) a otáčení. [37]. Tlačítka se používají k zapojení a odpojení robotických ramen a spuštění diatermie [37]. Systém Hugo používá rukojeť, ale od systému Versius se liší tím, že vypadá jako by neměla tlačítka nebo joysticky, ale místo toho používá pro uchopování a stříhání jakousi spoušť [38].

### 6.3. Haptická zpětná vazba

U klasicky prováděné laparoskopie byla operátérova ruka v přímém kontaktu s koncovým efektozem, což mu umožnilo „cítit“ koncový efektor a jeho interakci s pacientovou tkání. Bez této přímé vazby v případě robotických systémů musí operátor plně spoléhat na to, co vidí, nebo mu robotický systém musí nabídnout určité napodobení fyzického kontaktu – dát mu zpětnou vazbu.

Haptická zpětná vazba představuje přínos, co se týče síly a taktilních vjemů u ramen a koncových efektorů. [67]. Haptická zpětná vazba zahrnuje nejrůznější způsoby, jak chirurgovi poskytnout tyto vjemy. Silová zpětná vazba je systém, kdy síla vyvinutá koncovým efektozem se promítne do síly, kterou operátor pocítí v rukách a prstech spočívajících na ručních manipulátorech [12,13,26,29,54]. Haptická zpětná vazba dává chirurgovi pocítit sílu, jíž nástroje při operaci působí na tkáň. Rovněž může dát pocítit trakci a pnutí, jimiž nástroje působí na tkáň či odpor nebo prokluzování tkáně [8,13,54,68].

Je prokázáno že, příprava a realizace haptické zpětné vazby je velmi náročná záležitost. Ještě předtím, než operátor dostane zpětnou vazbu, je třeba, aby danou sílu pocítil robotický systém. Existují dvě metody, které se používají k zaznamenání použité síly – jednak přímé vnímání síly (DFS) a nepřímé vnímání síly (IFS). DFS využívá čidel (snímačů) na konci nástroje [69–78]. Velikost síly, která působí na tkáň, se tak měří přímo, ale problém spočívá v tom, že je nutné mít malé snímače, které je třeba u systémů s opětovně použitelnými koncovými efektozy sterilizovat [6,70,73,74,76–80]. IFS lze řešit pomocí senzorů v robotickém rameni, které měří sílu vynaloženou akčním členem nebo pomocí počítače zpracovávajícího vizuální znaky (visual cues). Jelikož snímače pro IFS nejsou na konci nástrojů, nepředstavuje jejich sterilizace problém [70,76–78,81]. Avšak na druhou stranu IFS neměří velikost použité síly přímo na konci nástroje, takže haptická zpětná vazba, kterou operátor dostane, představuje pouze aproximaci skutečně použité síly [70,76–78,81].

Robotický systém da Vinci nemá haptickou zpětnou vazbu, ale mnoho novějších systémů ji má nebo ji má provedenou ve formě silové zpětné vazby (tabulka 3). Z důvodu absence haptické zpětné vazby u systému da Vinci musí operátor spoléhat na vizuální znaky (náповědy), aby mohl odhadnout, jak velkou silou koncové efektozy působí na tkáň [54,82,83]. Avatera, MiroSurge, Revo-I, Versius a SPRINT mají haptickou zpětnou vazbu, ale k dispozici jsou jen omezené informace o způsobu jejího provedení v případě těchto robotických systémů. Součástí systému Senhance je haptická zpětná vazba, která poskytuje velmi reálné taktilní vjemy. Senhance umožňuje operátorovi vnímat sílu, jakou nástroje působí na tkáň [7,8,11–14]. Kromě toho haptická zpětná vazba systému Senhance dokáže předávat informace o síle, jakou graspery uchopují tkáň a o trakci, kterou graspery na tkáň působí s citlivostí 35 gramů [7,8,10]. Systém Senhance také dokáže amplifikovat sílu, kterou operátor vnímá například při provádění sutury [12,14].

Vzhledem k tomu, že haptická zpětná vazba byla u robotických systémů zavedena teprve nedávno, většina studií, které hodnotí její efektivitu a účinnost byla provedena na základě simulací. Nicméně, mnoho studií uvádí, že haptická zpětná vazba představuje pro robotické systémy jistou výhodu [84–86]. Její absence může vést k situaci, kdy na tkáň může působit nepřiměřená síla [79,84]. Haptická zpětná vazba nejenže snižuje možnost zdravotní újmy způsobené pacientovi, ale může také zkrátit dobu učení tzv. „learning curve“ u chirurgů zběhlých v laparoskopické chirurgii [82,84]. Haptika může být užitečná při nácviku takových úkonů, jako je uvázání uzle, ale v jiných případech je její přínos neutrální, jako například u provádění sutury, pokud ji porovnáme s učením bez haptické zpětné vazby [68,87,88]. Nicméně jiné studie uvádějí, že to obecně nemá na „learning curve“ žádný vliv [9,87].

### 6.4. Odstranění třesu

Odstranění třesu znamená, že robotický systém eliminuje nechtěné přirozené pohyby rukou operátéra přenášené na nástroje. Lidské ruce vykazují do jisté míry nechtěné pohyby, zejména u lidí vyššího věku. Pokud by během operace došlo k přenosu takového pohybu na nástroje, mohlo by to pro pacienta představovat riziko. Systémy da Vinci a Senhance mají zabudované odstranění třesu, což

zvyšuje míru přesnosti, s jakou dokážou pracovat koncové efekторы [13,14,16,18]. Odstranění třesu mohou mít i další robotické systémy, ale bohužel o nich neexistuje dostatek literatury, tudíž jsou k dispozici jen omezené informace.

### 6.5. Pomocné ovladače

Kromě ručních ovladačů mají robotické systémy některé pomocné ovladače, jimiž operátor řídí další prvky systému (tabulka č. 3). Tyto dodatečné ovladače, jimiž lze u endoskopu řídit například diatermii, pozici nebo přiblížení (zoom) mohou mít podobu nožních spínačů, klávesnice nebo dotykové obrazovky.

U systému da Vinci lze pomocí nožních spínačů přepínat ovládání ručních manipulátorů mezi endoskopem a kterýmkoliv dalším ze tří nástrojových ramen [18,19,89]. Sešlápnutím nožního pedálu, jsou vstupy ručního manipulátoru převedeny na ovládání pozice endoskopu. Není-li nástrojové rameno přepnuto na ovládání operátorem, je uzamčeno v dané pozici [18,19,89]. Spojkový pedál odpojí ruční manipulátory od všech nástrojů a umožní tak operátorovi změnit pozici ručních manipulátorů [18,19,89]. Autoři Tareq, Shahab, Luke a Abhilash [19] zmiňují, že může dojít k pochybením způsobeným přerušením průběhu operace v důsledku použití nožních spínačů pro přepnutí mezi ovládáním nástrojů a ovládáním endoskopu. Další čtyři pedály lze nakonfigurovat tak, že aktivují funkce koncových manipulátorů, jako je například kauterizace [18,19,89]. Systém Revo-I má podobný způsob ovládání nožním spínačem jako da Vinci [17,24]. U systému Hugo se diatermie aktivuje nožními spínači [38]. Systémy Avatera, Hugo a SPORT mají nožní spínače; zatímco u systému Avatera nožní spínač slouží k ovládání endoskopu, není známo k čemu u těchto systémů slouží všechny dostupné funkce nožních spínačů [15,38,44].



**Obr. 1.** Operační konzole. (A) da Vinci [90], (B) MiroSurge [63], (C) Revo-I [91] (D) Senhance [5], (E) Versius pro práci v sedě a (F) ve stoje [92].



Tabulka č 3 Řešení konzole a ovladačů

	Ovládání nástroje	Zpětná vazba	Odstaře ní třesu	lutching	Přepínání	Ovládaní	Diatermie	V sedě	Odkazy
	ramene	Od nástrojů		Arms	mezi rameny	endoskopu		Ve stoje	
Avatera	A	F	N/A	N/A	N/A	H	H	S	[15]
da Vinci (all versions)	A	E	P	H	H	H	H	S	[14,16–19]
Hugo	B	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	H	S	[38]
MiroSurge	A	F	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	S	[28,63,93]
Revo-I	A	F	N/A	H	H	H	H	S	[17,22,24]
Senhance	C	F	P	N/A	N/A	I	N/A	S	[8,9,11,13,14,26,36,54,56,57,94]
SPORT Surgical System	A	N/A	N/A	N/A	NP	N/A	N/A	S	[33,35,42,44]
SPRINT	A	N/A	N/A	H	N/A	N/A	N/A	S	[30,31,34,40]
Versius	D	F	N/A	G	G	G	G	S/U	[6,12,32,37,39]

P = Prvek je zastoupen NP = Prvek není zastoupen N/A = v době zpracování přehledu nebyly informace k dispozici A = Manipulátor napodobuje koncové efekty prostřednictvím příslušných úchopů B = Manipulátor se aktivuje spouští C = Manipulátor je umístěn na tradičních laparoskopických nástrojích D = Manipulátor vypadá jako herní konzole E = pro zpětnou vazbu se používají vizuální znaky (visual cues) F = U ručních ovladačů je použita haptická zpětná vazba G = Prvek zajišťují pomocné ovladače na ručním ovladači. H = Prvek je v nožním spínači. I = Endoskop je ovládán pohybem očí S = v sedě U = v sedě nebo ve stoje

Vedle nožních spínačů mnoho robotických systémů obsahuje další pomocné ovladače, které mají nejrůznější funkce. Systém da Vinci má dva další panely, každý na jedné straně operátora, které umožňují škálování pohybu, kalibraci endoskopu a ovládání systému jako je např. start, nouzové zastavení (emergency stop) a pohotovostní režim (standby) [18]. Některé novější verze da Vinci mají také dotykovou obrazovku pro nastavení preferencí a operačních parametrů [58]. Systém Revo-I má dvě tlačítka nouzového zastavení, jedno je na pravé straně operační konzole a druhé je na chirurgickém vozíku [24]. Senhance má klávesnici plné velikosti, ale její utility nejsou známy [55].

## 7. Pacientské rozhraní

Pacientské rozhraní je prostředek pro interakci mezi robotickým systémem a pacientem určený k provedení chirurgického zákroku. To se odvíjí od různých přístupů k řešení pacientského vozíku, na němž jsou robotická ramena. Některé robotické systémy mají jen jeden vozík, zatímco jiné mají samostatný vozík pro každé robotické rameno. Pacientské rozhraní tak zahrnuje všechna ramena, která jednotlivé robotické systémy mají, trokar, který pro robotické rameno zajišťuje vstup do pacientova těla a koncových efektorů, které jsou v kontaktu s tkáněmi pacienta.

### 7.1. Pacientský vozík

Pacientské vozíky robotických systémů nesou robotická ramena. Tyto vozíky mají dva typy konstrukčního řešení, buď má každé nástrojové rameno svůj vlastní vozík, nebo je jen jeden vozík na kterém jsou všechna přístrojová ramena (tabulka č. 4, obr. 2).



**Obr. 2.** Pacientské vozíky. (A) da Vinci Xi [90], (B) da Vinci SP [90], (C) Senhance [5], (D) MiroSurge [63], (E) Versius [92] a (F) Revo-I [91].

Avatera, da Vinci, Revo-I, SPORT Surgical System a SPRINT – všechny tyto systémy používají jeden integrovaný vozík pro všechna ramena [15,18,49]. Tyto vozíky mají kolečka pro snazší přemísťování jak na operačním sále, tak i mezi operačními sály [18]. Pacientský vozík zpravidla stojí u hlavy operačního stolu. Většina systémů s jedním integrovaným vozíkem využívá centrální rameno pro endoskopickou kameru a další ramena drží nástavce koncových efektorů. Jiné řešení pacientských vozíků spočívá v tom, že každé rameno má svůj vlastní vozík. Hugo, MiroSurge, Senhance a Versius používají pro každé rameno samostatný vozík. Podobně jako je tomu u konstrukce jednoho integrovaného vozíku tak i tyto mají kolečka pro lepší manévrovatelnost po operačním sále. Nicméně MiroSurge nemá podvozek, ale je místo toho namontován přímo na operační stůl [28,29,63,80].

Obě řešení mají své výhody a nevýhody. U integrovaného patientského vozíku jsou všechna potřebná ramena vždy na jednom místě. Ramena se navzájem registrují, protože mají společné místo připojení. Co se týče samostatných patientských vozíků, musí každý z nich registrovat jak pacienta, tak i ostatní vozíky. Navíc integrovaný patientský vozík má veškerou kabeláž mezi rameny uvnitř zařízení a stačí jen připojovací kabely k operační konzoli nebo centrálnímu vozíku. Pokud se používají samostatné vozíky, musí být každý vozík a operační konzole propojeny přes centrální vozík, což může vést k většímu množství kabelů na operačním sále.

Přesto má ale konstrukční řešení samostatných vozíků některé velké výhody oproti integrovaným. U integrovaných vozíků může určitý problém představovat střet ramen, protože všechna ramena mají společné místo připojení. To může znamenat, že operace se musí přerušit na dobu potřebnou k přenastavení ramen, aby nedošlo k jejich kolizi. V případě systémů s individuálními vozíky, lze každý takový vozík s ramenem umístit tak, že je zajištěn optimální přístup k pacientovi v případě nouze a současně se minimalizuje možnost střetu ramen [6,13,14,95]. Navíc některé systémy, které používají samostatné vozíky, jako je například Versius a Senhance, operačnímu týmu umožňují používat pouze takový počet ramen, jaký je pro daný zákrok zapotřebí [8,9,11,12,14]. Kromě toho v případě selhání ramene před operací nebo v jejím průběhu lze u samostatných vozíků velmi rychle a snadno takové rameno nahradit, protože ramena jsou vzájemně zaměnitelná [8,9]. V případě systémů s jedním integrovaným vozíkem znamená taková porucha ramene zrušení celé operace nebo nutnost uchýlit se ke klasické ruční laparoskopii.

## 7.2. Robotická ramena

Robotická ramena umožňují, aby se koncové efekторы dostaly v 3D prostoru v těle pacienta na příslušné místo a byly tak zavedeny do operačního pole. Robotické systémy pro laparoskopickou chirurgii bývaly tradičně systémy s více vstupy (vpichy) tzv. „multi port“), které vyžadovaly pro každý nástroj samostatné robotické rameno včetně endoskopu (obr. 2). Nyní však některé novější systémy jako např. da Vinci SP, SPORT Surgical system a SPRINT používají jen jeden vstup [20,40,42,44]. Rozdíly mezi systémy s více vpichy a jedním vpichem jsou podrobně popsány dále v části Přístup a Trokar.

Systémy s více vstupy byly prvně komerčně nasazeny počátkem nového milénia u systémů da Vinci a Zeus. Při uvedení na trh měly oba systémy tři robotická ramena – dva pro nástroje, jako je například grasper nebo jehelec, a jeden pro endoskop [16,18,49]. Avšak u novějších verzí systému da Vinci bylo přidáno čtvrté rameno [16,18]. Operátor může přepínat mezi jednotlivými rameny, což mu umožňuje ovládat během operace podle potřeby všechna čtyři ramena [18,19]. Většina robotických systémů s více vstupy dnes nabízí tři nebo čtyři nástrojová ramena a jedno endoskopické (tabulka č. 4). Jak už bylo zmíněno, některé robotické systémy s více vpichy jako například Senhance jsou modulární a operátor může používat tolik ramen, kolik potřebuje až do maximálního počtu ramen podporovaných daným systémem [11,14].

Na počátku operace a v jejím průběhu je nutné ramena dát na pozici pro zavedení nástrojů. Systém da Vinci má tlačítka na každém kloubovém spoji, kterým lze daný kloub uvolnit, což operačnímu týmu umožňuje nastavit rameno do požadované pozice. Jakmile se tlačítko uvolní, rameno se opět uzamkne v dané poloze [18]. Některé systémy jako např. MiroSurge používají soft robotický přístup. To znamená, že operátor nebo někdo z týmu může přestavět ramena tím, že je jednoduše posune jinam. Ramena si to zapamatují a zůstávají v dané poloze bez nutnosti používat tlačítka nebo konzoli [29]. Systém Senhance dokáže detekovat trokar a přizpůsobit rameno, tak jak je pro zavedení nástroje zapotřebí [9].

Systémy s jedním vpichem obecně mají jedno rameno, které se dokuje u místa vstupu do pacientova těla nebo u trokaru [30,31,40,42,44,96]. Tyto systémy zpravidla podporují dva nástroje plus endoskop zasunovaný pomocí vodícího tubusu skrze trokar [30,31,40,42,44,96]. U systémů s více vstupy je daný maximální rozsah pohybu robotických ramen, aby se zabránilo jejich vzájemné kolizi. Software používaný u těchto systémů zabraňuje střetu ramen a někdy i přesune ramena do jiného postavení, aby byl umožněn plný přístup k místu zákroku, nicméně, někdy je nutné ramena fyzicky přemístit. Většina systémů s jedním vstupem tento problém obchází použitím pouze jednoho robotického ramene. Toto rameno drží veškeré nástroje potřebné pro zákrok a v pacientově těle jsou tyto nástroje ovládány systémem táhel a externích servomotorů [30,31,40,42,44,96].

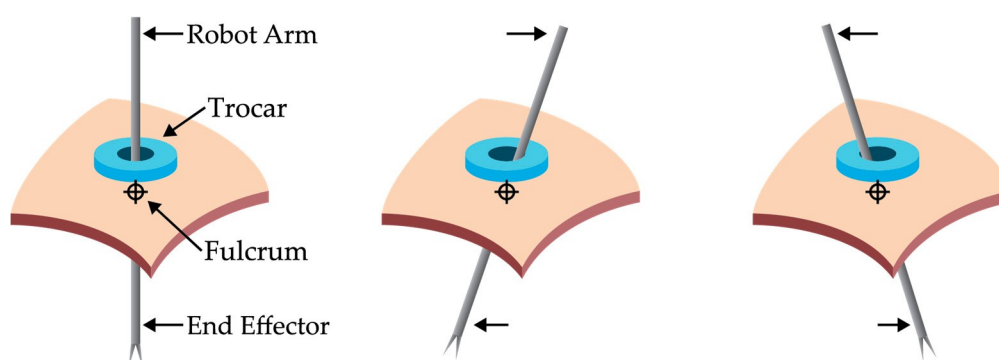
Společnost Intuitive Surgical má sice systém da Vinci Si s jedním dedikovaným vstupem, ale i systém da Vinci Xi může vykonávat operace s jedním vpichem [61,97]. Při používání systému da Vinci Xi pro operace s jedním vpichem se použijí pouze dvě nástrojová ramena ze tří [61]. Nástrojová ramena se kříží v trokaru tak, že pravé nástrojové rameno ovládá levý koncový efektor a levé pravý koncový efektor [61]. Řídící počítač systému da Vinci převede ruční ovladače tak, že operátor si není vědom jejich překřížení [58,61].

Část z celého pohybu zajišťují ramena a zbytek je zajišťován koncovými efektor. Většina ramen u systémů s více vstupy poskytuje volnost pohybu v rozsahu  $6^\circ - 7^\circ$ , což nástrojům koncových efektorů umožňuje pohyb v operačním poli. U většiny systémů s jedním vstupem s výjimkou systému da Vinci Xi s jedním vpichem je stupeň volnosti pohybu (DoF) ramene primárně pro zavedení tubusu do trokaru. Kromě toho ještě zahrnuje rotační pohyb v průběhu zavádění tubusu a nástrojů nebo pro zavádění a retrakci k dosažení větší hloubky v těle.

### 7.3. Trokar

Trokar představuje místo/a pro vstup a zavádění nástrojů, endoskopů a insuflace plynu při laparoskopické operaci. Vstupní místo je kolem nástroje utěsněno, aby se během operace zabránilo pronikání kapalin, plynů a patogenů do těla či naopak, jejich úniku ven. Čím větší je trokar, tím větší musí být incize pro vstup do dutiny břišní, což může vést k viditelnějšímu zjizvení. Robotické systémy s více vstupy používají trokary různých velikostí, avšak velikost nástrojů mají stejnou – 5mm a 8mm stejně tak i endoskopů - 12 mm.

U systémů s více vstupy se trokar používá jako opěra/pouzdro (fulcrum) pro nástroje a endoskop [40,66,80]. Nástroje krouží kolem fulcra tak, že koncový efektor se pohybuje opačným směrem než robotické rameno (obr. č. 3) [7,18,40]. Robotický systém automaticky převádí pohyby externího robotického ramene, aby odpovídaly pohybům vykonávaným operátorem [39,98]. Některé robotické systémy, například Senhance, automaticky identifikují ideální místo v břišní stěně, které plní funkci fulcra, čímž se minimalizuje pohyb trokaru [8,9,13,36]. MiroSurge je schopen sledovat trokar v reálném čase. To systému MiroSurge umožňuje udržet pevný bod fulcra vůči trokaru, přestože se trokar pohybuje. To je kritické zejména u takových zákroků, jako je miniinvazivní operace srdce, kdy se při dýchání hrudní stěna neustále pohybuje. [80].



**Obr. 3.** Efekt fulcra (fulcrum effect) u koncového efektoru, jímž pohybuje robotické rameno. Fulcrum je na břišní stěně. Při pohybu robotického ramene doprava se koncový efektor pohybuje doleva. Když se robotické rameno pohybuje doleva, bude se koncový efektor pohybovat doprava. Pohyby robotického ramene okolo fulcra jde opačným směrem.

U robotických systémů s jedním vstupem je zapotřebí větší trokar, protože oba nástroje a endoskop se musí vejít do stejného vpichu [30,31,40,42,96]. U systémů s jedním vstupem se do trokaru zasune zaváděcí tubus, který má samostatné kanály pro jednotlivé nástroje a endoskop. Velikost trokarů používaných ve srovnávaných systémech je uvedena v tabulce č. 4. Na rozdíl od robotů s více vstupy nebo tradiční laparoskopické chirurgie neplní trokar u robotických systémů s jedním vstupem roli fulcra pro nástroje. Nástroje mají klouby uvnitř pacientova těla, které umožňují manipulaci nezávisle na fulcru robotického ramene [10,58,61]. Výjimku tvoří některé systémy s více vstupy upravené pro operaci s jedním vpichem (portem). U těchto systémů se fulcrum stále nachází v trokaru používajícím upravený nástroj. [61]. Například u systému da Vinci s více rameny při operaci s jedním

vpichem a instrumentářiemi VeSPA (popsáno v další části) je trokar místem, kde dochází k vzájemnému překřížení ramen a zároveň funguje jako fulcrum pro robotické rameno [81].

Robotické systémy s jedním vpichem mají oproti systémům s více vpichy řadu výhod. První z nich je to, že stačí pouze jedna incize a pacient tak má i méně jizev. Navíc, pokud se využije přirozené zjizvení pupíku, tak pak může být pooperační jizva téměř neviditelná [40,96]. Systémy s jedním vpichem také u pacientů vykazují menší následnou bolest oproti metodě s více vpichy [96]. A jako poslední, robotické systémy s jedním vpichem se staly základem pro operace metodou natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES). Postup NOTES využívá přirozené tělní otvory jako jsou ústa, vagina, močová trubice či konečník k bezjizvovým výkonům, protože přístup k operačnímu poli je proveden interní incizí, pokud je v dutině břišní či pánevní oblasti [81,99,100].

**Tabulka č. 4** Pacientský vozík  
a rameno

Robot	počet ramen	Nástrojová ramena B	DOF	Trokar	Typ vozíku	Odkazy
Avatera	4	3	6	5 mm	Jeden	[15,25,26]
da Vinci (except SP)	4	3	7	8 mm	Jeden	[16,18,49]
da Vinci SP	1	2	7	S 25 mm	Jeden	[20]
Hugo	4	3	N/A	N/A	Samostatný	[38]
MiroSurge	3	2	7	N/A	samostatný <sup>A</sup>	[29,63,82,101]
Revo-I	4	3	7	12 mm	Jeden	[17,21–24]
Senhance	4	3	7	I 5 mm E 10 mm	Samostatný	[8,11–14,37]
SPORT Surgical System	1	2	N/A	S 25 mm	Jeden	[42,44,45]
SPRINT	1	2	6	S 30 mm	Jeden	[40,41]
Versius	5	4	7	5 mm	samostatný	[6,12,22,37,39,43]

Jeden = všechna ramena jsou na jednom vozíku; Samostatný = každé rameno má svůj vlastní vozík; N/A = v době zpracování přehledu nebyly informace k dispozici; DOF = stupeň volnosti pohybu; A = rameno je připevněno k operačnímu stolu; B = jedno z robotických ramen slouží pro endoskop; E = sloupec pod trokarem uvádí velikost vstupu pro endoskop, zatímco další velikosti trokaru platí pro nástroje; S ve sloupci pro trokarem znamená systémy s jedním vstupem, kde nástroje a endoskop se zavádějí stejným trokarem.

#### 7.4. Instrumentárium

Koncovými efekty se rozumí nástroje používané během operace. Ty slouží k provádění incizí, kauterizaci cév, k držení tkání a manipulování s nimi. Koncové efekty robotických systémů jsou podobné manuálnímu laparoskopickému instrumentáriu. Vzhledem k tomu, že systém da Vinci je komerčně dostupný již dvacet let, má ze všech robotických systémů k dispozici nejširší škálu koncových efektorů (tabulka č. 5 Instrumentárium). Nejenže má systém da Vinci nejvíce druhů koncových efektorů, má také nejvíce variant od každého druhu koncového efektoru. Například operatérům nabízí dvanáct různých pinzet, z nichž si mohou vybrat [16,102]. Ostatní robotické systémy mají menší sortiment koncových efektorů a nejběžnějšími druhy mezi nimi jsou pinzety, graspery, kauterové háčky, jehelce a nůžky (tabulka č. 2).

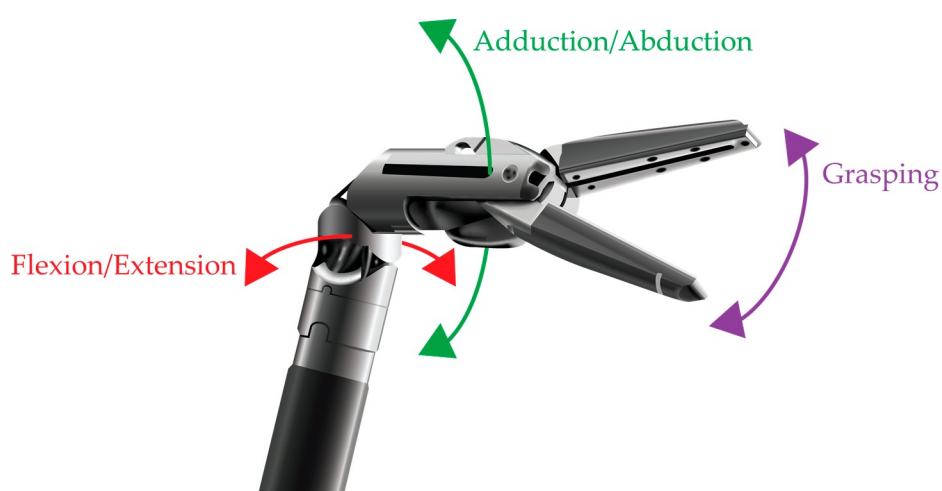
Nástroje používané pro kauterizaci a koagulaci často používají diatermii. Ale některé nástroje jako například cévní svorky fungují na principu mechanické síly, kterou cévu uzavrou, zejména pokud ji je nutné uzavřít jen dočasně. Nástroje pro diatermii jsou buď monopolární nebo bipolární [12,13,15,17,21,23,33,35,39,44,80,102]. Monopolární nástroje, jak už název sám napovídá, jsou takové, které v elektrickém obvodu mají jen aktivní elektrodu. Pacient má na těle neutrální elektrodu, aby se zajistil tok elektřiny. V monopolárních nástrojích jde elektrický proud od nástroje a prochází tělem pacienta k neutrální elektrodě. U bipolárních diatermických nástrojů jsou oba póly v koncovém efektoru. Bipolárními nástroji jsou zpravidla pinzetové desektory nebo graspery, kdy je na jednom konci aktivní elektroda a na druhém neutrální. Elektřina tak proudí pouze mezi těmito dvěma konci, aniž by procházela pacientovým tělem [103,104].

Koncové efekty pro nástroje u systému da Vinci používají EndoWrist – robotickou ruku. V robotickém rameni jsou umístěny servomotory, které pomocí táhel řídí pohyb robotické ruky EndoWrist. Bližší konec nástroje obsahuje řadu cívek (navijáků), přes něž je zajištěno připojení k robotickému rameni [18]. Tyto cívky jsou poháněny servomotory umístěnými v robotickém rameni, přičemž hnací kola (disky) v přístroji spolupracují s hnacími koly (disky) v rameni. Od každé cívky v bližším konci nástroje vedou tubusem dolů lanka, jež řídí stupeň volnosti pohybu (DoF) koncového efektoru [18]. Samotný koncový efektor má tři stupně volnosti, které odrážejí pohyb lidského zápěstí - ohnutí a natažení celého koncového efektoru; roztážení a přitažení hrotů a rozevření a sevření hrotů koncového efektoru. Další čtyři stupně volnosti ze sedmi, jež jsou v systému da Vinci k dispozici, zajišťuje robotické rameno –



pohyb dovnitř a ven (in and out), ohnutí nahoru a dolů (pitch), vodorovný pohyb do stran (yaw) a rotace [105].

O fungování nástrojů u jiných robotických systémů s více vpichy je poměrně málo informací, ale něco se lze dozvědět z obrázků nebo videí. Operační konzole a patientský vozík systému Revo-I je velmi podobný systému da Vinci, a to jak svojí koncepcí, tak dispozičním řešením. Podobné jsou si i nástroje a dokovací mechanismus i půdorys je stejný jako u systému da Vinci. Na základě obrázků autorů Abdela Raheema, Troya, Kima, Kima, Wona, Joon, Hyuna a Rhaa [21] a z videí firmy Revo Surgical Solutions [106] se zdá, že funkce koncových efektorů jsou podobné robotické ruce EndoWrist u systému da Vinci. Instrumentárium systému Verisus, jež rovněž napodobuje pohyby zápěstí, funguje podobně jako u systému da Vinci (obr. 4).



**Obr. 4.** Rozsah pohybů koncového efektoru EndoWrist systému da Vinci. Kybernetická ruka EndoWrist má podobné pohyby jako lidská ruka, ohnutí, roztažení, odtážení, přitažení a úchop.

Zatímco EndoWrist systému da Vinci má koncové efektor, jež fungují podobně jako lidské zápěstí (obr. 4), nástroje Senhance se více podobají klasickým laparoskopickým nástrojům [13]. Některé nástroje Senhance nemají na konci zápěstí, ale mají prostě jen koncový efektor, například pinzetu na konci nástrojového dřívku [107]. Některé nástroje vykazují určitou míru pohybu - ohnutí a roztažení podobně jako EndoWrist systému da Vinci, ale jejich pohyb má menší rozsah. Nástroje k dosažení stejného rozsahu pohybu, jaký má EndoWrist u systému da Vinci spoléhají na rotaci dřívku a konce (hrotu) [108,109]. Ve videích firmy Asensus Surgical, které jsou dostupné online, je možné vidět koncový efektor, který se nehýbe, zatímco hroty nástrojů se otevírají a zavírají, jak řežou nebo uchopují tkáň. Je vidět, jak robotická ramena vykonávají potřebné pohyby pro nastavení koncového efektoru na požadovanou pozici a jeho orientaci podle pokynů operátora, který robotem z operační konzole manipuluje [107,110].

Tabulka č. 5 Instrumentarium

Robot	Kauter háček	Kauter lžice	Aplik. svorky	Disektor	Pinzety	Grasper	Jehelce	Retraktory	Nůžky	Sheers	Stapler	Odsávání/ oplach	Cévní svorka	Opět. použití	Odkazy
Avatera				B		S	S		S					1	[15]
da Vinci Xi	M	M	S	B	SB	B	S	S	S	SM	S	S	S	±10	[16,102]
da Vinci SS <sup>1</sup>	M		S	S	SB	S	S		S			S			[102]
da Vinci SP <sup>2</sup>					S	S			S					N/A	[90]
Hugo <sup>3</sup>						I								±10	[38]
MiroSurge				I	I		S		I					N/A	[80,111]
Revo-I	M		I		I	I	S		M					20	[17,21,23]
Senhance	M	B		I		I			I					∞	[8,9,11,13,14]
SPORT Surgical System	M			B		SB	S		SM					1	[33,35,42,44]
SPRINT <sup>4</sup>						I								N/A	[30,31]
Versius	I	I				I	S		I					N/A	[12,39]

1 = SS je instrumentarium da Vinci Xi single site. 2 = K instrumentariu pro da Vinci SP jsou jen omezené informace. 3 = Minimum informací o dostupných nástrojích pro platformu v době psaní tohoto srovnání. S = znamená norma pro neelektrické. B = bipolární diatermie. M = monopolární diatermie. I = Obsahuje daný nástroj, ale více informací není k dispozici. R = Většina nástrojů je opětovně použitelná po určitý počet použití. Některé nástroje mohou mít kratší nebo delší životnost. ∞ = Není dáno žádné přesné omezení, kolikrát se smí nástroj použít.

Instrumentárium pro robotické systémy s jedním vpichem se zpravidla liší od instrumentária pro systémy s více vstupy. Místo využívání jednotlivých ramen má většina robotických systémů jedno rameno dokováno u jednoho trokaru. Nástroje se do dutiny břišní zavádějí dedikovanými nástrojovými tubusy (kanály) uvnitř většího zaváděcího tubusu. Toto instrumentárium nemá žádné externí kloubové spoje, veškeré pohyby probíhají uvnitř dutiny břišní. Většina nástrojů používá hadu podobné (hadovité) rameno, jež koncovým efektorům umožňuje plný rozsah pohybů v operačním poli. Rozsah pohybu se dá ještě zvětšit pohybem robotického ramene. Systém da Vinci SP používá jiné instrumentárium než ostatní systémy da Vinci. Ramena systému da Vinci SP mají vedle kloubu zápěstí stávajícího instrumentária EndoWrist ještě navíc v hadovitém rameni umístěný loketní kloub. V době přípravy tohoto přehledu nebyly k dispozici žádné podrobnosti o tom, jak tento loketní kloub pro instrumentárium da Vinci SP EndoWrist funguje. Instrumentárium pro da Vinci Xi s jedním vpichem je podobné standartnímu instrumentáriu pro EndoWrist, až na to, že má polopevný dřík. To umožňuje zavádění nástrojů zahnutou kanylou uvnitř trokaru [61,97].

Dalším důležitým aspektem instrumentária pro robotické systémy je jejich opětovné použití. Systém da Vinci se u většiny nástrojů striktně dodržuje limit deseti použití (několik málo nástrojů má dokonce limit stanoven pod deset použití). Každý nástroj má malou destičku tištěného obvodu (chip), který sleduje počet použití. Jakmile nástroj stanovený počet použití vyčerpá, přestane fungovat a je třeba ho vyměnit [18]. Revo-I používá podobný systém, ale s delší životností – až dvacet použití [23]. Senhance to má ošetřené jiným způsobem bez omezení životnosti instrumentária a výměnu nástrojů ponechává na rozhodnutí operátora [8,9,36]. Opětovně použitelné instrumentárium se musí před dalším použitím sterilizovat. Některé robotické systémy jako například Avatera a SPORT Surgical System mají jednorázové nástroje, které se smí použít pouze jednou [15,42].

## 8. Další směry vývoje

Vzhledem k současné konkurenci na trhu laparoskopické, roboticky asistované chirurgie by měly ceny robotických systémů a spotřebního materiálu jít dolů. To by mělo vést i ke snížení nákladů spojených s laparoskopickými robotickými systémy. Vezmeme-li v úvahu přínosy pro pacienta a snížení nákladů měly bychom začít pozorovat nárůst ve využívání robotických systémů při laparoskopických operacích. To povede k dalšímu snižování nákladů u laparoskopických robotických systémů, protože množstevní náklady sníží výdaje na robotické systémy, údržbu a spotřební materiál.

Ačkoliv si da Vinci stále drží primát v roboticky asistované laparoskopické chirurgii s jedním vpichem, je možné již narazit na pár konkurenčních systémů procházejících poslední fází testování. Jakmile tyto systémy budou k dispozici, budeme svědky snížení nákladů u roboticky asistované laparoskopické chirurgie a jejího většího rozmachu. S postupným klesáním nákladů a díky přednostem téměř bezjizvových zákroků se roboticky asistované laparoskopické operace stanou metodou preferovanou jak chirurgy, tak i pacienty. Kromě toho nemocnice, které si pořídily systém da Vinci Xi si s největší pravděpodobností zakoupí také instrumentárium EndoWrist, aby mohly s jedním robotickým systémem provádět laparoskopické zákroky jak s jedním, tak i s více vpichy. S postupným pronikáním laparoskopických robotických systémů na operační sály bude možné pozorovat i nárůst výkonů metodou NOTES a opravdu bezjizvových chirurgických zákroků. Je velmi pravděpodobné, že společnost Intuitive Surgical zavedením dedikovaného robotického systému s jedním vpichem u da Vinci SP také pravděpodobně představí instrumentárium, které bude možné použít s tímto systémem i pro zákroky NOTES, aby tak konkuroval specializovaným systémům NOTES, které vstupují na trh.

Navíc se augmentovaná realita pravděpodobně stane běžným prvkem budoucích robotických systémů a předmětem modernizace stávajících. Augmentovaná realita operátorům umožní promítnout charakteristiky operačního pole do živých záběrů z endoskopické kamery [11,112]. To lze použít ve spojení s technologiemi, které takové charakteristiky jako jsou cévy, nervy a dokonce i nádory mapují a jejich umístění promítnou v reálném čase na obrazovku operátora [4,113–115]. Navíc je možné takto promítnout i jiné obrazové záznamy pořízené v rámci diagnostikování či plánování zákroku. To operátorům pomůže zajistit vyšší bezpečnost a kvalitu po celou dobu zákroku, protože bude mít lepší přehled o zájmové oblasti a může se tak vyhnout větším cévám a nervům a zabránit tak u pacienta vzniku pooperačních potíží.

## 9. Závěry

Roboticky asistovaná chirurgie měla pomalý rozjed vzhledem k nákladům a patentům držení společností Intuitive Surgical, což omezovalo trh s robotickými systémy. S koncem platnosti patentů můžeme nyní pozorovat vzestup v počtu nových robotických systémů, které jsou nebo v brzké době budou k dispozici. Některé systémy již mají certifikaci CE a jsou nyní dostupné v Evropské Unii a systém Senhance společnosti Asensus Surgical již získal souhlas amerického Úřadu pro potraviny a léky (FDA) a mnoho dalších nyní u FDA prochází tímto schvalovacím řízením. Tyto nové roboty přispějí k vyšší konkurenci a snížení nákladů na tyto systémy, což zvýší jejich využívání. Roboticky asistovaná chirurgie se brzy stane mnohem běžnější než ručně prováděné laparoskopické operace.

**Author Contributions:** Conceptualization, S.K.L. and G.D.G.; writing—original draft preparation, S.K.L.; writing—review and editing, G.N. and G.D.G.; visualization, S.K.L., supervision, G.D.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by the South Western Institute for Robotics and Automation in Health (SWIRAH).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Kwoh, Y.S.; Hou, J.; Jonckheere, E.A.; Hayati, S. A Robot with Improved Absolute Positioning Accuracy for CT Guided Stereotactic Brain Surgery. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **1988**, *35*, 153–160. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Yates, D.R.; Vaessen, C.; Roupret, M. From Leonardo to da Vinci: The history of robot-assisted surgery in urology. *BJU Int.* **2011**, *108*, 1708–1713. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Rao, P.P. Robotic surgery: New robots and finally some real competition. *World J. Urol.* **2018**, *36*, 537–541. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Juric, S.; Flis, V.; Debevc, M.; Holzinger, A.; Zalik, B. Towards a low-cost mobile subcutaneous vein detection solution using near-infrared spectroscopy. *Sci. World J.* **2014**, *2014*, 365902. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. TransEnterix Inc. Media Kit. Available online: <https://transenterix.com/media-kit> (accessed on 24 February 2020).
6. Brodie, A.; Vasdev, N. The future of robotic surgery. *Ann. R. Coll. Surg. Engl.* **2018**, *100*, 4–13. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Beasley, R.A. Medical Robots: Current Systems and Research Directions. *J. Rob.* **2012**, *2012*. [[CrossRef](#)]
8. Gueli Alletti, S.; Rossitto, C.; Cianci, S.; Perrone, E.; Pizzacalla, S.; Monterossi, G.; Vizzielli, G.; Gidaro, S.; Scambia, G. The Senhance™ surgical robotic system (“Senhance”) for total hysterectomy in obese patients: A pilot study. *J. Robot. Surg.* **2017**, *12*, 229–234. [[CrossRef](#)]
9. Hutchins, A.R.; Manson, R.J.; Lerebours, R.; Farjat, A.E.; Cox, M.L.; Mann, B.P.; Zani, S. Objective Assessment of the Early Stages of the Learning Curve for the Senhance Surgical Robotic System. *J. Surg. Educ.* **2019**, *76*, 201–214. [[CrossRef](#)]
10. Joseph, R.A.; Goh, A.C.; Cuevas, S.P.; Donovan, M.A.; Kauffman, M.G.; Salas, N.A.; Miles, B.; Bass, B.L.; Dunkin, B.J. “Chopstick” surgery: A novel technique improves surgeon performance and eliminates arm collision in robotic single-incision laparoscopic surgery. *Surg. Endosc.* **2010**, *24*, 1331–1335. [[CrossRef](#)]
11. Samalavicius, N.E.; Janusonis, V.; Siaulyis, R.; Jasėnas, M.; Deduchovas, O.; Venckus, R.; Ezerskiene, V.; Paskeviciute, R.; Klimaviciute, G. Robotic surgery using Senhance®robotic platform: Single center experience with first 100 cases. *J. Robot. Surg.* **2020**, *14*, 371–376. [[CrossRef](#)]
12. Sheth, K.R.; Koh, C.J. The Future of Robotic Surgery in Pediatric Urology: Upcoming Technology and Evolution Within the Field. *Front. Pediatr.* **2019**, *7*, 259. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Spinelli, A.; David, G.; Gidaro, S.; Carvello, M.; Sacchi, M.; Montorsi, M.; Montroni, I. First experience in colorectal surgery with a new robotic platform with haptic feedback. *Colorectal Dis.* **2018**, *20*, 228–235. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Stark, M.; Pomati, S.; D’Ambrosio, A.; Giraudi, F.; Gidaro, S. A new telesurgical platform—preliminary clinical results. *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.* **2015**, *24*, 31–36. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Avateramedical GmbH. What Makes Avatera so Special? Available online: <https://www.avatera.eu/en/avatera-system> (accessed on 13 February 2020).
16. Hanly, E.J.; Talamini, M.A. Robotic abdominal surgery. *Am. J. Surg.* **2004**, *188*, 19S–26S. [[CrossRef](#)]

17. Kang, C.M.; Chong, J.U.; Lim, J.H.; Park, D.W.; Park, S.J.; Gim, S.; Ye, H.J.; Kim, S.H.; Lee, W.J. Robotic Cholecystectomy Using the Newly Developed Korean Robotic Surgical System, Revo-i: A Preclinical Experiment in a Porcine Model. *Yonsei Med. J.* **2017**, *58*, 1075–1077. [[CrossRef](#)]
18. Palep, J.H. Robotic assisted minimally invasive surgery. *J. Minimal Access Surg.* **2009**, *5*, 1–7. [[CrossRef](#)]
19. Tareq, D.; Shahab, E.; Luke, A.R.; Abhilash, P. Remote Presence: Development and Usability Evaluation of a Head-Mounted Display for Camera Control on the da Vinci Surgical System. *Robotics* **2019**, *8*, 31. [[CrossRef](#)]
20. Gonzalez-Rivas, D.; Ismail, M. Subxiphoid or subcostal uniportal robotic-assisted surgery: Early experimental experience. *J. Thorac. Dis.* **2019**, *11*, 231–239. [[CrossRef](#)]
21. Abdel Raheem, A.; Troya, I.S.; Kim, D.K.; Kim, S.h.; Won, P.D.; Joon, P.S.; Hyun, G.S.; Rha, K.H. Robot-assisted Fallopian tube transection and anastomosis using the new REVO-I robotic surgical system: Feasibility in a chronic porcine model. *BJU Int.* **2016**, *118*, 604–609. [[CrossRef](#)]
22. Chang, K.D.; Abdel Raheem, A.; Choi, Y.D.; Chung, B.H.; Rha, K.H. Retzius-sparing robot-assisted radical prostatectomy using the Revo-i robotic surgical system: Surgical technique and results of the first human trial. *BJU Int.* **2018**, *122*, 441–448. [[CrossRef](#)]
23. Kim, D.K.; Park, D.W.; Rha, K.H. Robot-assisted Partial Nephrectomy with the REVO-I Robot Platform in Porcine Models. *Eur. Urol.* **2016**, *69*, 541–542. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Lim, J.H.; Lee, W.J.; Park, D.W.; Yea, H.J.; Kim, S.H.; Kang, C.M. Robotic cholecystectomy using Revo-i Model MSR-5000, the newly developed Korean robotic surgical system: A preclinical study. *Surg. Endosc.* **2016**, *31*, 3391–3397. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Schwaibold, H.; Wiesend, F.; Bach, C. The age of robotic surgery – Is laparoscopy dead? *Arab J. Urol.* **2018**, *16*, 262–269. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Rassweiler, J.J.; Autorino, R.; Klein, J.; Mottrie, A.; Goetzen, A.S.; Stolzenburg, J.-U.; Rha, K.H.; Schurr, M.; Kaouk, J.; Patel, V.; et al. Future of robotic surgery in urology. *BJU Int.* **2017**, *120*, 822–841. [[CrossRef](#)]
27. Darwich, I.; Stephan, D.; Klöckner-Lang, M.; Scheidt, M.; Friedberg, R.; Willeke, F. A roadmap for robotic-assisted sigmoid resection in diverticular disease using a Senhance™ Surgical Robotic System: Results and technical aspects. *J. Robot. Surg.* **2020**, *14*, 297–304. [[CrossRef](#)]
28. DLR Institute of Robotics and Mechatronics. MiroSurge. Available online: <https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11674/#gallery/29787> (accessed on 14 February 2020).
29. Konietschke, R.; Hagn, U.; Nickl, M.; Jorg, S.; Tobergte, A.; Passig, G.; Seibold, U.; Le-Tien, L.; Kubler, B.; Groger, M.; et al. The DLR MiroSurge - A robotic system for surgery. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 12–17 May 2009; pp. 1589–1590.
30. Petroni, G.; Niccolini, M.; Caccavaro, S.; Quaglia, C.; Menciassi, A.; Schostek, S.; Basili, G.; Goletti, O.; Schurr, M.O.; Dario, P. A novel robotic system for single-port laparoscopic surgery: Preliminary experience. *Surg. Endosc.* **2013**, *27*, 1932–1937. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Petroni, G.; Niccolini, M.; Menciassi, A.; Dario, P.; Cuschieri, A. A novel intracorporeal assembling robotic system for single-port laparoscopic surgery. *Surg. Endosc.* **2013**, *27*, 665–670. [[CrossRef](#)]
32. Atallah, S.; Parra-Davila, E.; Melani, A.G.F. Assessment of the Versius surgical robotic system for dual-field synchronous transanal total mesorectal excision (taTME) in a preclinical model: Will tomorrow’s surgical robots promise newfound options? *Tech. Coloproctol.* **2019**, *23*, 471–477. [[CrossRef](#)]
33. Barret, E. V22 - Single-port radical prostatectomy with using SPORT Surgical System. *Eur. Urol. Suppl.* **2018**, *17*, e2142. [[CrossRef](#)]
34. Carbone, M.; Turini, G.; Petroni, G.; Niccolini, M.; Menciassi, A.; Ferrari, M.; Mosca, F.; Ferrari, V. Computer guidance system for single-incision bimanual robotic surgery. *Comput. Aided Surg.* **2012**, *17*, 161–171. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Crouzet, S. PE49 - Single port robotic partial and hemi nephrectomy using a novel single port robotic platform: Pilot study in a pig model. *Eur. Urol. Suppl.* **2018**, *17*, e2319. [[CrossRef](#)]
36. Gueli Alletti, S.; Rossitto, C.; Cianci, S.; Restaino, S.; Costantini, B.; Fanfani, F.; Fagotti, A.; Cosentino, F.; Scambia, G. Telelap ALF-X vs Standard Laparoscopy for the Treatment of Early-Stage Endometrial Cancer: A Single-Institution Retrospective Cohort Study. *J. Minim. Invasive Gynecol.* **2016**, *23*, 378–383. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Khandalavala, K.; Shimon, T.; Flores, L.; Armijo, P.R.; Oleynikov, D. Emerging surgical robotic technology: A progression toward microbots. *Ann. Laparosc. Endosc. Surg.* **2019**, *5*, 1–18. [[CrossRef](#)]
38. Medtronic. *Robotic-Assisted Surgery (RAS) Analyst Update*; Medtronic, Ed.; Medtronic: Dublin, Ireland, 2019.



39. Peters, B.S.; Armijo, P.R.; Krause, C.; Choudhury, S.A.; Oleynikov, D. Review of emerging surgical robotic technology. *Surg. Endosc.* **2018**, *32*, 1636–1655. [CrossRef]
40. Piccigallo, M.; Scarfogliero, U.; Quaglia, C.; Petroni, G.; Valdastri, P.; Menciassi, A.; Dario, P. Design of a Novel Bimanual Robotic System for Single-Port Laparoscopy. *IEEE ASME Trans. Mechatron.* **2010**, *15*, 871–878. [CrossRef]
41. Sanchez, L.A.; Petroni, G.; Piccigallo, M.; Scarfogliero, U.; Niccolini, M.; Lui, C.; Stefanini, C.; Zemiti, N.; Menciassi, A.; Poignet, P.; et al. Real-time control and evaluation of a teleoperated miniature arm for Single Port Laparoscopy. In Proceedings of the 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Boston, MA, USA, 30 August–3 September 2011; pp. 7049–7053.
42. Seeliger, B.; Diana, M.; Ruurda, J.P.; Konstantinidis, K.M.; Marescaux, J.; Swanström, L.L. Enabling single-site laparoscopy: The SPORT platform. *Surg. Endosc.* **2019**, *33*, 3696–3703. [CrossRef]
43. Tamaki, A.; Rocco, J.W.; Ozer, E. The future of robotic surgery in otolaryngology—Head and neck surgery. *Oral Oncol.* **2020**, *101*, 104510. [CrossRef]
44. Titan Medical Inc. SPORT Surgical System. Available online: <https://titanmedicalinc.com/technology/> (accessed on 16 February 2020).
45. Titan Medical Inc. *Investor Presentation*; Titan Medical Inc.: Toronto, ON, Canada, 2016.
46. Davies, B. Robotic Surgery—A Personal View of the Past, Present and Future. *Int. J. Adv. Robot Syst.* **2015**, *12*, 54–60. [CrossRef]
47. Falk, V.; Mintz, D.; Grunenfelder, J.; Fann, J.I.; Burdon, T.A. Influence of three-dimensional vision on surgical telemanipulator performance. *Surg. Endosc.* **2001**, *15*, 1282–1288. [CrossRef]
48. Kim, H.L.; Schulam, P. The PAKY, HERMES, AESOP, ZEUS, and da Vinci robotic systems. *Urol. Clin. N. Am.* **2004**, *31*, 659–669. [CrossRef]
49. Bodner, J.; Wykypiel, H.; Wetscher, G.; Schmid, T. First experiences with the da Vinci™ operating robot in thoracic surgery. *Eur. J. Cardiothorac. Surg.* **2004**, *25*, 844–851. [CrossRef] [PubMed]
50. Broeders, I.; Ruurda, J. Robots revolutionizing surgery: The Intuitive Surgical “Da Vinci” system. *Ind. Robot* **2001**, *28*, 387–391. [CrossRef]
51. Falk, V.; Diegeler, A.; Walther, T.; Banusch, J.; Brucerius, J.; Raumans, J.; Autschbach, R.; Mohr, F.W. Total endoscopic computer enhanced coronary artery bypass grafting. *Eur. J. Cardiothorac. Surg.* **2000**, *17*, 38–45. [CrossRef]
52. Schwab, K.; Smith, R.; Brown, V.; Whyte, M.; Jourdan, I. Evolution of stereoscopic imaging in surgery and recent advances. *World J. Gastrointest. Endosc.* **2017**, *9*, 368–377. [CrossRef] [PubMed]
53. DeBeche-Adams, T.; Eubanks, W.S.; Fuente, S.G. Early experience with the Senhance®-laparoscopic/robotic platform in the US. *J. Robot. Surg.* **2019**, *13*, 357–359. [CrossRef] [PubMed]
54. Melling, N.; Barr, J.; Schmitz, R.; Polonski, A.; Miro, J.; Ghabban, T.; Wodack, K.; Izbicki, J.; Zani, S.; Perez, D. Robotic cholecystectomy: First experience with the new Senhance robotic system. *J. Robot. Surg.* **2019**, *13*, 495–500. [CrossRef]
55. TransEnterix Inc. *Fact Sheet: SENHANCE™ Surgical System Highlights*; TransEnterix Inc.: Morrisville, NC, USA, 2018.
56. Altobelli, E.; Gidaro, S.; Bove, A.M.; Falavolti, C.; Ruiz, E.; Rosa, T.; Stark, M.; Buscarini, M. TELELAP ALF-X: A Novel Telesurgical System for the 21st Century. *J. Urol.* **2013**, *189*, e575–e576. [CrossRef]
57. Rumolo, V.; Rosati, A.; Tropea, A.; Biondi, A.; Scambia, G. Senhance robotic platform for gynecologic surgery: A review of literature. *Updates Surg.* **2019**, *71*, 419–427. [CrossRef]
58. Kaouk, J.H.; Haber, G.-P.; Autorino, R.; Crouzet, S.; Ouzzane, A.; Flamand, V.; Villers, A. A Novel Robotic System for Single-port Urologic Surgery: First Clinical Investigation. *Eur. Urol.* **2014**, *66*, 1033–1043. [CrossRef]
59. Simaan, N.; Bajo, A.; Reiter, A.; Wang, L.; Allen, P.; Fowler, D. Lessons learned using the insertable robotic effector platform (IREP) for single port access surgery. *J. Robot. Surg.* **2013**, *7*, 235–240. [CrossRef]
60. Galvao Neto, M.; Ramos, A.; Campos, J. Single port laparoscopic access surgery. *Tech. Gastrointest. Endosc.* **2009**, *11*, 84–93. [CrossRef]
61. Haber, G.-P.; White, M.A.; Autorino, R.; Escobar, P.F.; Kroh, M.D.; Chalikhonda, S.; Khanna, R.; Forest, S.; Yang, B.; Altunrende, F.; et al. Novel Robotic da Vinci Instruments for Laparoendoscopic Single-site Surgery. *Urology* **2010**, *76*, 1279–1282. [CrossRef] [PubMed]
62. Kaouk, J.H.; Goel, R.K.; Haber, G.P.; Crouzet, S.; Stein, R.J. Robotic single-port transumbilical surgery in humans: Initial report. *BJU Int.* **2009**, *103*, 366–369. [CrossRef]

63. DLR Institute of Robotics and Mechatronics. MiroSurge. Available online: <https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11674/#gallery/28728> (accessed on 14 February 2020).
64. Ding, J.; Goldman, R.E.; Xu, K.; Allen, P.K.; Fowler, D.L.; Simaan, N. Design and Coordination Kinematics of an Insertable Robotic Effectors Platform for Single-Port Access Surgery. *IEEE ASME Trans. Mechatron.* **2013**, *18*, 1612–1624. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
65. Kai, X.; Goldman, R.E.; Jienan, D.; Allen, P.K.; Fowler, D.L.; Simaan, N. System design of an Insertable Robotic Effector Platform for Single Port Access (SPA) Surgery. In Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, USA, 11–15 October 2009; pp. 5546–5552.
66. Falk, V.; McLoughlin, J.; Guthart, G.; Salisbury, J.K.; Walther, T.; Gummert, J.; Mohr, F.W. Dexterity enhancement in endoscopic surgery by a computer-controlled mechanical wrist. *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.* **1999**, *8*, 235–242. [[CrossRef](#)]
67. Burdea, G.C. *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*; John Wiley and Sons Ltd.: New York, NY, USA, 1996.
68. King, C.H.; Culjat, M.O.; Franco, M.L.; Bisley, J.W.; Carman, G.P.; Dutson, E.P.; Grundfest, W.S. A Multielement Tactile Feedback System for Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery. *IEEE Trans. Haptics* **2009**, *2*, 52–56. [[CrossRef](#)]
69. Ballantyne, H.G. The Pitfalls of Laparoscopic Surgery: Challenges for Robotics and Telerobotic Surgery. *Surg. Laparosc. Endosc. Percutaneous Tech.* **2002**, *12*, 1–5. [[CrossRef](#)]
70. Callaghan, D.; McGrath, M.; Coyle, E. Force Measurement Methods in Telerobotic Surgery: Implications for End-Effector Manufacture. In Proceedings of the 25th International Manufacturing Conference (IMC25), Dublin, Ireland, 3 September 2008; pp. 389–398.
71. Ehrampoosh, S.; Dave, M.; Kia, M.A.; Rablau, C.; Zadeh, M.H. Providing haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery: A direct optical force-sensing solution for haptic rendering of deformable bodies. *Comput. Aided Surg.* **2013**, *18*, 129–141. [[CrossRef](#)]
72. Haouchine, N.; Winnie, K.; Cotin, S.; Yip, M. Vision-Based Force Feedback Estimation for Robot-Assisted Surgery Using Instrument-Constrained Biomechanical Three-Dimensional Maps. *IEEE Robot. Autom. Lett.* **2018**, *3*, 2160–2165. [[CrossRef](#)]
73. Okamura, M.A. Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery. *Curr. Opin. Urol.* **2009**, *19*, 102–107. [[CrossRef](#)]
74. Reiley, C.E.; Akinbiyi, T.; Burschka, D.; Chang, D.C.; Okamura, A.M.; Yuh, D.D. Effects of visual force feedback on robot-assisted surgical task performance. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* **2008**, *135*, 196–202. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
75. Trejos, A.L.; Escoto, A.; Naish, M.D.; Patel, R.V. Design and Evaluation of a Sterilizable Force Sensing Instrument for Minimally Invasive Surgery. *IEEE Sens. J.* **2017**, *17*, 3983–3993. [[CrossRef](#)]
76. Yu, L.; Yan, Y.; Li, C.; Zhang, X. Three-dimensional nonlinear force-sensing method based on double microgrippers with E-type vertical elastomer for minimally invasive robotic surgery. *Robotica* **2018**, *36*, 865–881. [[CrossRef](#)]
77. FUTEK Advanced Sensor Technology Inc. Challenges in Designing and Manufacturing Haptic Sensors for Robotic Surgery Platforms. Available online: <https://media.futek.com/content/futek/files/pdf/quality/challenges-in-designing-and-manufacturing-sensors-for-robotic-surgery.pdf> (accessed on 14 February 2020).
78. Yang, C.; Xie, Y.; Liu, S.; Sun, D. Force Modeling, Identification, and Feedback Control of Robot-Assisted Needle Insertion: A Survey of the Literature. *Sensors* **2018**, *18*, 561. [[CrossRef](#)]
79. Akinbiyi, T.; Reiley, C.E.; Saha, S.; Burschka, D.; Hasser, C.J.; Yuh, D.D.; Okamura, A.M. Dynamic augmented reality for sensory substitution in robot-assisted surgical systems. In Proceedings of the 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, New York, NY, USA, 30 August–3 September 2006; p. 567.
80. Hagn, U.; Konietschke, R.; Tobergte, A.; Nickl, M.; Jörg, S.; Kübler, B.; Passig, G.; Gröger, M.; Fröhlich, F.; Seibold, U.; et al. DLR MiroSurge: A versatile system for research in endoscopic telesurgery. *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* **2010**, *5*, 183–193. [[CrossRef](#)]
81. Orekhov, A.; Abah, C.; Simaan, N. *Snake-Like Robots for Minimally Invasive, Single Port, and Intraluminal Surgeries*; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: Singapore, 2019.
82. Culjat, M.; Franks, J.; King, C.H.; Franco, M.; Bisley, J.; Grundfest, W.; Dutson, E. Pneumatic balloon actuators for tactile feedback in robotic surgery. *Ind. Robot* **2008**, *35*, 449–455. [[CrossRef](#)]

83. Amirabdollahian, F.; Livatino, S.; Vahedi, B.; Gudipati, R.; Sheen, P.; Gawrie-Mohan, S.; Vasdev, N. Prevalence of haptic feedback in robot-mediated surgery: A systematic review of literature. *J. Robot. Surg.* **2017**, *12*, 11–25. [[CrossRef](#)]
84. Wagner, C.R.; Stylopoulos, N.; Howe, R.D. The Role of Force Feedback In Surgery: Analysis of Blunt Dissection. In Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS 2002, Orlando, FL, USA, 24–25 March 2002; pp. 68–74.
85. Tholey, P.G.; Desai, E.J.; Castellanos, E.A. Force Feedback Plays a Significant Role in Minimally Invasive Surgery: Results and Analysis. *Ann. Surg.* **2005**, *241*, 102–109. [[CrossRef](#)]
86. Wagner, C.R.; Howe, R.D. Force Feedback Benefit Depends on Experience in Multiple Degree of Freedom Robotic Surgery Task. *IEEE Trans. Robot.* **2007**, *23*, 1235–1240. [[CrossRef](#)]
87. Zhou, M.; Tse, S.; Derevianko, A.; Jones, D.; Schwaitzberg, S.; Cao, C. Effect of haptic feedback in laparoscopic surgery skill acquisition. *Surg. Endosc.* **2012**, *26*, 1128–1134. [[CrossRef](#)]
88. Kitagawa, M.; Dokko, D.; Okamura, A.M.; Yuh, D.D. Effect of sensory substitution on suture-manipulation forces for robotic surgical systems. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* **2005**, *129*, 151–158. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
89. OncoHEMA Key. Robotic Surgery. Available online: <https://oncohemakey.com/robotic-surgery/> (accessed on 4 February 2020).
90. Intuitive Surgical Inc. *Press Resources: Images: Da Vinci systems and simulation*; Intuitive Surgical Inc.: Sunnyvale, CA, USA, 2017; Volume 2020.
91. Revo Surgical Solutions. Surgical Solution, Revo. Available online: <http://revosurgical.com/#/revo.html> (accessed on 24 September 2019).
92. CMR Surgical Ltd. Press Kit. Available online: <https://cmrsurgical.com/press-kit/> (accessed on 24 February 2020).
93. DLR Institute of Robotics and Mechatronics. Telemanipulation in Minimally Invasive Surgery. Available online: [https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-3795/16616\\_read-40529/](https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-3795/16616_read-40529/) (accessed on 14 February 2020).
94. Altobelli, E.; Stefano, G.; Falavolti, C.; Bove, A.M.; Ruiz, E.M.; Stark, M.; Lazzaretti, S.S.; Buscarini, M. 1412 Vesico-Urethral Anastomosis Using A Novel Telesurgical System With Haptic Sensation: The TelelapAlf-X. A Pilot Study. *J. Urol.* **2013**, *189*, e578. [[CrossRef](#)]
95. Chang, K.D.; Raheem, A.A.; Rha, K.H. Novel robotic systems and future directions. *Indian J. Urol.* **2018**, *34*, 110. [[CrossRef](#)]
96. Dobbs, R.W.; Halgrimson, W.R.; Madueke, I.; Vigneswaran, H.T.; Wilson, J.O.; Crivellaro, S. Single-port robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy: Initial experience and technique with the da Vinci<sup>®</sup> SP platform. *BJU Int.* **2019**, *124*, 1022–1027. [[CrossRef](#)]
97. Zhao, J.; Feng, B.; Zheng, M.-H.; Xu, K. Surgical robots for SPL and NOTES: A review. *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.* **2015**, *24*, 8–17. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
98. Gruijthuijsen, C.; Lin, D.; Morel, G.; Poorten, E.V. Leveraging the Fulcrum Point in Robotic Minimally Invasive Surgery. *IEEE Robot. Autom. Lett.* **2018**, *3*, 2071–2078. [[CrossRef](#)]
99. Wang, Z.; Phee, S.J.; Wong, J.; Ho, K.-Y. Development of a robotic platform for natural orifice transluminal endoscopic surgery. *Gastrointest. Interv.* **2012**, *1*, 40–42. [[CrossRef](#)]
100. Phee, S.J.; Low, S.C.; Huynh, V.A.; Kencana, A.P.; Sun, Z.L.; Yang, K. Master and slave transluminal endoscopic robot (MASTER) for natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery (NOTES). In Proceedings of the 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Minneapolis, MN, USA, 3–6 September 2009; pp. 1192–1195.
101. Hagn, U.; Nickl, M.; Jörg, S.; Passig, G.; Bahls, T.; Nothhelfer, A.; Hacker, F.; Le-Tien, L.; Albu-Schäffer, A.; Konietschke, R.; et al. The DLR MIRO: A versatile lightweight robot for surgical applications. *Ind. Robot* **2008**, *35*, 324–336. [[CrossRef](#)]
102. Intuitive Surgical Inc. *Davinci Xi, X-Instrument & Accessory Catalog-19*; Intuitive Surgical Inc.: Sunnyvale, CA, USA, 20 January 2019.
103. King, C. Endoscopic electrosurgery an overview. *Gastrointest. Nurs.* **2011**, *9*, 28–33. [[CrossRef](#)]
104. Van de Berg, N.; Van den Dobbelaert, J.; Jansen, F.; Grimbergen, C.; Dankelman, J. Energetic soft-tissue treatment technologies: An overview of procedural fundamentals and safety factors. *Surg. Endosc.* **2013**, *27*, 3085–3099. [[CrossRef](#)]
105. Bovo, F.; De Rossi, G.; Visentin, F. Surgical robot simulation with BBZ console. *J. Vis. Surg.* **2017**, *3*, 57. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
106. Revo Surgical Solutions. *Revo-i Overview*; Revo Surgical Solutions: Seoul, Korea, 2019; Volume 2019.

107. TransEnterix Inc. *Senhance 3 mm Instruments for Hernia Repair—Dr. Dietmar Stephen*; TransEnterix Inc.: Morrisville, NC, USA, 2019; Volume 2020.
108. TransEnterix Inc. *RADIA Articulating Surgical Instrument*; TransEnterix Inc.: Morrisville, NC, USA, 2017; Volume 2020.
109. TransEnterix Inc. *Senhance Robotic Creation of Fundoplication; Advanced Suturing—Porcine Model*; TransEnterix Inc.: Morrisville, NC, USA, 2017; Volume 2020.
110. TransEnterix Inc. *Senhance Robotic Articulating Instrument in Colorectal Dissection*; TransEnterix Inc.: Morrisville, NC, USA, 2017; Volume 2020.
111. DLR Institute of Robotics and Mechatronics. MICA. Available online: <https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11672/#gallery/29823> (accessed on 14 February 2020).
112. Khor, W.S.; Baker, B.; Amin, K.; Chan, A.; Patel, K.; Wong, J. Augmented and virtual reality in surgery—the digital surgical environment: Applications, limitations and legal pitfalls. *Ann. Transl. Med.* **2016**, *4*, 454. [[CrossRef](#)]
113. Nizamoglu, M.; Tan, A.; Gerrish, H.; Barnes, D.; Dziewulski, P. Infrared technology to improve efficacy of venous access in burns population. *Eur. J. Plast. Surg.* **2015**, *39*, 37–40. [[CrossRef](#)]
114. Crisan, S.; Tarnovan, I.G.; Crisan, T.E. A Low Cost Vein Detection System Using Near Infrared Radiation. In Proceedings of the IEEE Sensors Applications Symposium, San Diego, CA, USA, 6–8 February 2007.
115. Chin, K.; Engelsman, A.F.; Chin, P.T.K.; Meijer, S.L.; Strackee, S.D.; Oostra, R.J.; Van Gulik, T.M. Evaluation of collimated polarized light imaging for real-time intraoperative selective nerve identification in the human hand. *Biomed. Opt. Express* **2017**, *8*, 4122–4134. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).