

Robotika v chirurgii

Sára Sujová

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY
Technická 2896/2, Brno 616 69, Czech Republic
182999@vutbr.cz

Abstrakt: Seminárna práca sa zaoberá technológiami robotiky v chirurgii. V prvej časti je predstavená konštrukcia robotických systémov s dôrazom na aplikáciu odozvy. Druhá časť práce popisuje robotické systémy z hľadiska úrovne autonómie robotov. Poslednou časťou je výber z dostupných štatistík o robotike v chirurgii.

Kľúčové slová: robotika, chirurgia, autonómia, odozva, chirurgický robot, MIRS

1 Úvod

Technológie robotiky v chirurgii sa v posledných desaťročiach tešia veľkej obľube, hlavne vďaka zdokonaleniu presnosti, stability a obratnosti v porovnaní s tradičnou chirurgiou. Vďaka tomu dosahujú v niekoľkých odvetviach výrazne lepšie výsledky z hľadiska efektivity a invazívnosti zákrokov, rýchlejšej rekonvalescencie pacienta alebo miernejších pooperačných následkov. Roboti majú uplatnenie v mnohých chirurgických špecializáciách.

Historicky prvým použitým operačným robotom bol Arthrobot z Kanady, ktorý bol zostavený a prvýkrát použitý v roku 1983. Za ním nasledovala éra robotov typu ZEUS, ktoré mali viac robotických ramien. Potom NASA vyvinula pre potreby kozmonautov a vojakov systém daVinci, ktorý začal byť vo veľkom využívaný aj v civilnom zdravotníctve. V Českej Republike sa systém daVinci ako prvý pokročilý robotický systém využíva od roku 2005. [4]

2 Časti chirurgického robota

Zložitosť chirurgických robotov závisí predovšetkým od vykonávanej funkcie a stupňa autonómie. Rozdeľuje sa na dve základné časti.

Prvou je ovládacia konzola, cez ktorú operátor ovláda robota. Väčšinou pozostáva z ergonomického kresla, okuliarov pre videnie rozšírenej reality v panoramatickom zobrazení, pri nižších systémoch autonómie napr. joysticky pre ovládanie pohybov robota a ovládací panel prídavných funkcií.

Druhou časťou je chirurgický robot vykonávajúci zákrok. Jeho telo sa skladá z pevného podstavca, na ktorý je pripevnená teleskopická veža s manipulátormi. Tie pozostávajú z ramien a držiakov, na ktoré sú pripevnené nástroje. Nástroje majú pre dosiahnutie haptickej a kinestetickej odozvy na povrchu smart materiály imitujúce svalovú a nervovú odozvu. [1]

Od konštrukcie robotického ramena a nástrojov závisí počet stupňov voľnosti a medze limitujúce robota počas operácií. Za významný krok vo vývoji chirurgických robotov pre oblasť kardiochirurgie bolo naprogramovanie a optimalizácia pohybu vodiacich káblov v krvnom riečišti s názvom rotate-on-retraction (optimálny pohyb káblov a smerovanie hrotu). [3]

Pre oblasť MIRS – minimálne invazívnej robotickej chirurgie sú navrhované a vyvíjané nástroje, ktoré simulujú pohyb ľudských prstov/ruky ako napr. trojprstá ruka s 9 stupňami voľnosti. [9]

2.1 Aplikácia haptickej odozvy

Na vnímaní haptikou sa podieľajú dva fyziologické procesy. Prvým z nich je vnímanie hmatovým zmyslom pomocou receptorov umiestnených pod kožou – mechanoreceptorov. Tieto receptory snímajú informácie z povrchu kože ako vibrácie alebo tlak. Druhý proces je propiocepcia, tj. vnímanie pomocou receptorov umiestnených v šľachách a svaloch. [13]

Haptická odozva je dôležitou súčasťou chirurgickej praxe, čo implikuje jej dôležitosť aj pri vývoji chirurgických robotov a vzdelávaní sa pri práci s nimi. V skrátenej forme ide o tri procesy: zachytenie signálu, spracovanie signálu a poskytnutie odozvy operátorovi/systému k rozhodovaniu. Na zachytenie podnetov sa využívajú rôzne typy senzorov – tenzometry, kapacitné a indukčné senzory, optické senzory, magnetické senzory, piezoelektrické a pyroelektrické senzory a ich kombinácie v rôznych smart materiáloch. Väčšinou sa kladie dôraz na čo najrýchlejšiu odozvu a nízku závislosť na rušení prostredím. [15]

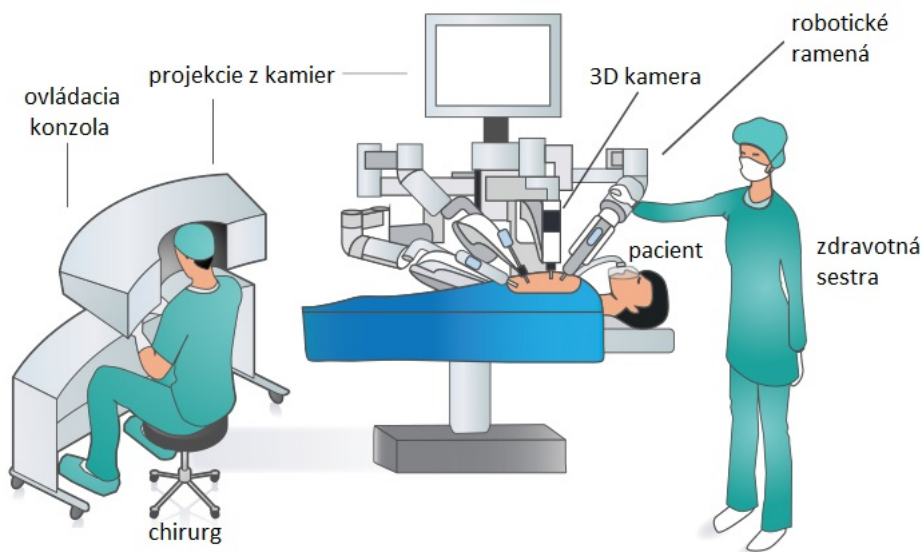


Figure 1: Schéma chirurgického robotického systému [1]

Následne je signál vyfiltrovaný, porovnaný s funkčným rozsahom na vyradenie hrubých chýb a prepočítaný pre systém daného zobrazovadla.

Pri poskytovaní odozvy sa využíva zapojenie robotov sériovo alebo paralelne v podobe rôznych podložiek, tréningových predmetov, až po celé sety (napr. rukavice). Pre odbor robotickej chirurgie sa zároveň často používajú zobrazovače v prostredí rozšírenej reality (symbolizované zmenou farieb, štruktúr, vykresľovanie kriviek v reálnom čase). K vývoju týchto metód výrazne prispieva dopyt v zábavnom priemysle.[15]

3 Úrovně autonómie chirurgických robotov a ich využitie v praxi

Podľa článku [17] z roku 2017 je dosiahnuteľná autonómnosť robotov rozdelená do šiestich štádií: žiadna autonómia, robotická asistancia, autonómia v úlohách, podmienená autonómia, vysoká autonómia a plná autonómia.

Systém nemá *žiadnu autonómiu*, keď je pohyb robota stopercentne závislý na “pokynoch” chirurga (operátora). V tomto prípade má operátor na starosti monitoring stavu pacienta, nastavenie parametrov, rozhodovanie aj vykonávanie príkazov. S rozvinutím tohto odvetvia vznikla metóda tzv. teleoperácií pomocou prvých daVinci systémov, kedy bolo umožnené operovať pacientov na diaľku s využitím komunikačnej linky. Chirurgovi bolo umožnené sedieť v inej miestnosti, inom meste a pri špecifických úkonoch vyžadujúcich špecialistu aj v inom štáte. [5]

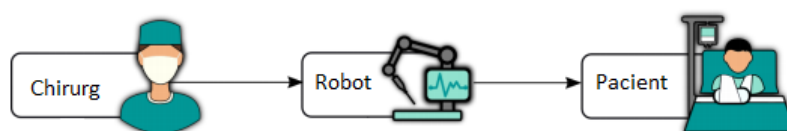


Figure 2: Schéma systému bez autonómie [2]

Keďže v tomto odvetví nie je kladený dôraz na AI a výpočtové systémy, čoraz viac sa vývoj zameriava na oblasť mikrochirurgie. Cieľom je riešenie patológií na bunkovej úrovni (cca od roku 2018), čo by umožnilo predovšetkým opravu ciev a nervov (napr. navrátenie zraku nevidiacim pacientom, závisí však od konkrétnej diagnózy). Druhou oblasťou zamerania je minimálne invazívna robotická chirurgia. [10]

Pod systémy s nulovou autonómiou patria aj endoskopické systémy ako napr. AESOP alebo ZEUS.

Druhou kategóriou robotov podľa autonómnosti je *robotická asistancia*, kedy robot asistuje chirurgovi pri stanovených úkonoch a interaguje s ním na primitívnej úrovni. V tomto štádiu robot slúži výhradne ako podpora,

rozhodnutia sú vždy len na doktorovi. V praxi to znamená, že robot má vo svojich databázach naprogramované pohyby, ktoré vykoná po príkaze operátora. Zároveň systém poskytuje doktorovi získané dáta ako spätnú väzbu. [2]

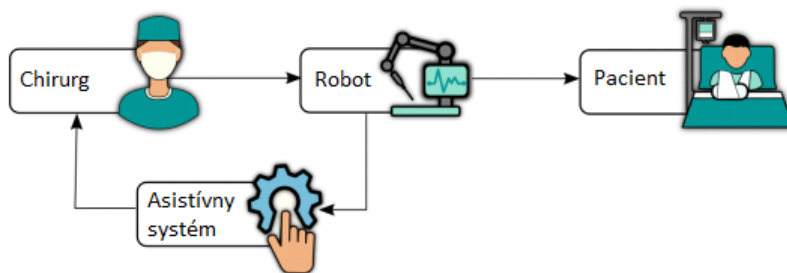


Figure 3: Schéma systému robotického asistenta [2]

Pre funkčnosť asistenčných chirurgických robotov sú potrebné funkcie ako sledovanie dráhy nástrojov, interakcie s tkanivom, sledovanie očí alebo príkazov od chirurga. Veľmi dôležitá je aj haptická odozva.

Robotický asistenti využívajú tiež niekoľko prístupov k rozšírenej realite, ktorú poskytujú chirurgovi formou pasívnej asistencie – tj. poskytujú dáta za hranicou ľudského videnia. Prvým prístupom je využitie počítačového videnia, takže získavanie informácií z obrazových dát. Ďalší prístup je získavanie kinematických a dynamických dát z manipulátorov a senzorov. Posledný prístup je využitie strojového učenia napr. na asistované plánovanie trasy pri MIRS systémoch. Pri strojovom učení sa využíva analýza tela pacienta pomocou CT, MRI a laserových pointerov. Výhodou týchto systémov je možnosť prispôbiť sa pohyblivým cieľom (pľúca, srdce) s veľmi vysokou presnosťou. Systémy pasívnej asistencie je možné využiť aj na hľadanie abnormalít v tele pacienta (iný tvar, farba, tuhosť orgánov), deformácií, poškodení a ich vyhodnocovanie. [10]

Tieto asistenčné systémy sú väčšinou riadené hlasovými pokynmi chirurga. Robot vždy vykoná pokyn len v prípade, že jednoznačne rozumel jeho zadaniu. V opačnom prípade upozorní (väčšinou zvukovým) hlásením chirurga, ktorý pokyn následne zopakuje. Každý lekár pracujúci s robotom má svoju osobnú kartu, na ktorú nahovorí základné príkazy v angličtine. Druhým spôsobom rozpoznania chirurgických úloh je sledovanie očí a pohybov chirurga. Tento prístup ale vyžaduje pripevnenie zariadenia s kamerami a senzorami na hlavu chirurga. Pre nepraktickosť a obmedzené použitie tohto prístupu nie je pre prax veľmi prínosný a preto sa jeho vývoju nevenuje veľká pozornosť. Riešením je získavanie týchto dát zo zariadení používaných k iným úkonom – napr. mikroskopy alebo okuliare s rozšírenou realitou. [7]

Systémy s *autonómiou v úlohách* sú schopné automaticky vykonať určité úlohy prikázané operátorom. Oproti robotickým asistentom sú schopné monitorovať pacienta v reálnom čase, tvoriť komplexné vzorce a súvislosti, ale rozhodovanie o operácii a jej jednotlivých krokoch, rovnako aj voľba parametrov zostáva na hlavnom chirurgovi. Podľa hierarchie zamestnancov na operačnom sále je možné týchto robotov zaradiť na pozíciu asistujúceho chirurga. [6]

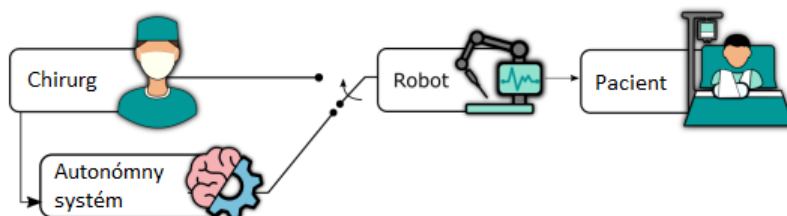


Figure 4: Schéma systému s autonómiou v úlohách [2]

Okrem monitoringu v reálnom čase a rozšírenej reality sú tieto roboty schopné analyzovať a rozpoznávať gestá, jednotlivé premety a dianie v rámci snímok. Tieto stroje dokážu veľmi dobre vykonávať repetitívne úlohy ako je šitie (STAR robot), odstraňovanie poškodených alebo napadnutých tkanív pri zachovaní čo najväčšieho množstva zdravých tkanív (CYBER KNIFE). Nevýhodou je, že s komplexnosťou úlohy klesá presnosť daného výkonu (publikovaný pokles medzi 15-30%). Zatiaľ je teda použitie týchto robotov obmedzené jednoduchými aplikáciami. [2]

Podmiernená autonómia pri chirurgických robotoch znamená, že chirurg vyberie a schváli plán operácie, dohliada a monitoruje činnosť systému, ale do výkonu v ideálnom prípade vôbec nezasahuje.

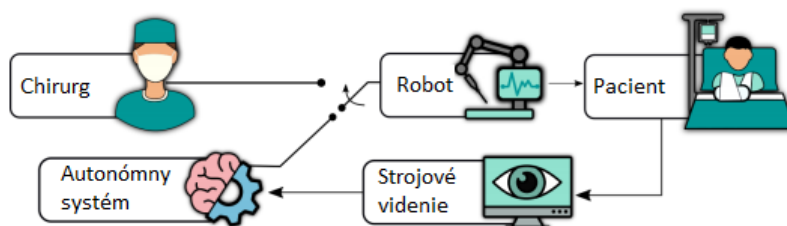


Figure 5: Schéma systému s podmnenou autonómiou [2]

Je dôležité, aby bol systém schopný vnímať, extrahovať a analyzovať jednotlivé kontextové prvky a na ich základe aktualizovať plán operácie v reálnom čase. Na zobrazovanie sa preto používajú klasické metódy ako použitie CT, MRI, plenoptických 3D kamier v kombinácii s vykresľovaním štruktúr pomocou GPU na základe získaných dát. Súčasťou je aj sledovanie pohybu fyzicky odpojených objektov – ihly, peány. [2]

Prvé schválené robotické systémy s podmienenou autonómiou v chirurgii budú pravdepodobne využívané na terapie ožarovaním pri nádoroch na ťažko dostupných miestach v ľudskom tele. [16]

Ďalšie dve štádiá sa podľa aktuálnych noriem a zákonov pohybujú v teoretickej rovine alebo vývoji pred uvedením do riadnej chirurgickej praxe. V prípade *vysokej autonómie* ide o roboty, ktoré sú schopné samostatne sa rozhodnúť pod vedením operátora. Zároveň interpretujú operátorovi informácie pred a počas operácie, upozornia na prípadné komplikácie, ktoré sa snažia vyriešiť. Tieto systémy sú v posledných rokoch vyvíjané pre použitie v oblasti onkológie a transplantácií. Pri *plnej autonómii* chirurgických robotov už chirurg ani operátor nie je potrebný. Stroj je schopný samostatného rozhodovania, vykonávania všetkých úkonov a riešenia všetkých komplikácií, čomu zodpovedá aj vybavenie nástrojmi, funkciami a kapacitou sa rozhodovať. [2] [11]

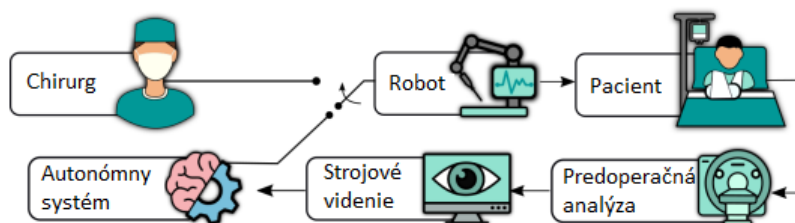


Figure 6: Schéma systému s vysokou autonómiou [2]

Pri robotoch v chirurgii sa v profesionálnej aj laickej sfére diskutuje morálne a etické hľadisko použitia. Obavy plynú z potreby detailne vyškoleného personálu pri robotoch s nižšou formou autonómie, čo v minulosti viedlo k niekoľkým súdnym aj mimosúdnym sporom. Pri robotoch s vyššou formou autonómie sa verejnosť obáva pochybenia zo strany AI systémov a zároveň toho, že robotom zatiaľ nie je možné naprogramovať pravú ľudskosť, takže systém nemusí vždy jednať súlade s práním a obavami pacienta. [17] Vďaka týmto diskusiám boli pre úrovne autonómie robota stanovené bezpečnostné prvky. [12]

4 Výber z faktov a štatistík

Publikovaná literatúra uvádza pre roky 2015, 2016 a 2017 každoročne cca 15% nárast počtu vykonaných operácií pomocou systému daVinci. Trend v ďalších rokoch nie je presne spočítaný, v závislosti na počte vyrobených a predaných systémov sa predpokladá približne rovnaký trend.

Nahlásená poruchovosť strojov sa v tomto časovom období pohybuje medzi 0,4% a 4,6%. Väčšina porúch súvisí s mechanickým poškodením robotického ramena v oblasti kĺbov. Pred rokom 2015 boli časté poruchy ako ulomenie časti stroja a ich spadnutie do operačného priestoru a problémy s elektronikou. [8]

Najviac chirurgických robotov je v prevádzke v Severnej Amerike, druhá v poradí je Európa. Väčšina robotov je používaná v nemocniciach. Výskumné centrá a ambulancie majú menej než tretinové zastúpenie. Do roka 2027 sa očakáva exponenciálny nárast záujmu o operácie aj nákup robotickej techniky.

Od roku 2000 do roku 2013 bolo v USA zaznamenaných 144 smrť v súvislosti s robotickou chirurgiou. Vo viac než polovici prípadov bola vylúčená priama súvislosť smrti pacienta s použitím robota. V žiadnom zo zvyšných prípadov nebolo potvrdené priame zavinenie smrti robotom. Za rovnaké obdobie bolo zaznamenaných viac než tisíc zranení v súvislosti s použitím chirurgických robotov. Dôležitým faktorom pri posudzovaní vplyvu robota na zhoršenie zdravotného stavu je posúdenie rizikovosti konkrétneho výkonu. [8]

Približne 60% operácií je do dnešného dňa vykonávaných na ženách. Ošetrojúci lekári tvrdia, že hlavným rozhodovacím faktorom pre ženy je estetické hľadisko. Robot je schopný zredukovať jazvu z 10-15 cm na napr. štyri jazvy po insercii nástrojov, ktoré v ideálnom prípade do niekoľkých rokov úplne zmiznú. Dôležitým faktorom je aj redukovaná doba rekonvalescencie. [14]

S rozvojom robotickej chirurgie boli zaznamenané aj iné výhody, než len estetické a rekonvalescenčné hľadisko. Často spomínané faktory sú menšia bolestivosť a menšia strata krvi. Zo strany chirurga je to napríklad menšie svalové napätie počas výkonu, eliminácia vplyvu nepresnosti ľudských rúk a lepšia sústredenosť pri dlhých zákrokoch. [1]

5 Záver

Robotika v chirurgii sa od predstavenia prvého chirurgického robota v 80. rokoch minulého storočia vyvinula v mnohých oblastiach. Momentálne predstavuje špičkový posun v chirurgických metódach s ďalekosiahlymi dôsledkami. Vylepšenia umožňujú zlepšenie presnosti a obratnosti, vykonávanie nových zákrokov vďaka aplikácii nových zobrazovacích a výpočtových metód. Použitie robotov v chirurgii je stále len v začiatkoch. Pomalý progres v zavedení nových metód je pripisovaný nedostatku dát zo štúdií s náhodnými testovacími skupinami, čo je dôsledkom finančnej záťaže spojennej s nákupom zariadení. Je možné predpokladať, že s rastúcim záujmom o oblasť robotickej chirurgie bude testovanie nových metód a zariadení menej časovo a finančne náročné. Zároveň je pozorovateľná úzka spojitosť s vývojom v iných oblastiach priemyslu, napr. vývoj výpočtovej techniky alebo implementácia AI. Zároveň sa v najbližších rokoch očakáva výrazný posun v oblasti nanotechnológií a ich využitie v robotickej chirurgii. To by umožnilo použitie na diaľku ovládaných nanobotov na analýzu tkanív alebo mikrozákroky v organizme napr. v oblasti neurochirurgie.

Z morálneho a etického hľadiska je pravdepodobnosť výmeny klasickej chirurgie za robotickú chirurgiu s plne automatickými robotmi veľmi nízka. Z momentálnych dát a úvah nie je možné odhadnúť, či bude v budúcnosti možné bez ľudských zásahov robotmi opraviť akýkoľvek ľudský organizmus. Z hľadiska rozmanitosti diagnóz, tkanív a odlišnosti každého organizmu sa dá predpokladať, že robotická chirurgia bude nasledujúcich desaťročiach naďalej slúžiť ako podporný prostriedok klasickej chirurgie, ale rozhodovanie (pozdnejšie schvaľovanie plánu operácie) zostane vždy doménou chirurgov. Plne autonómne chirurgické systémy bude možné použiť v akútnych prípadoch napr. v oblasti vojenskej medicíny, nie pri plánovaných zákrokoch.

Zdroje

- [1] Robotic surgeries - addressing patient comfort with aid of robotic technology. *ICICI Securities* (2021-03-24, url: <http://content.icicidirect.com/mailimages/MarketWrap210918.html>).
- [2] ATTANASIO, A., SCAGLIONI, B., MOMI, E. D., FIORINI, P., AND VALDASTRI, P. Autonomy in surgical robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 4, 1 (2021-05-03), annurev-control-062420-090543.
- [3] ERCAN, E. Rotate-on-retract procedural automation for robotic-assisted percutaneous coronary intervention: First clinical experience. *Case Reports in Cardiology* (2018), 3.
- [4] FRIED, M. Roboty a automatizace v chirurgii. *AUTOMA - časopis pro automatizační techniku* 2002, 10 (c2016).
- [5] H.-ABEDIN-NASAB, M. *Handbook of Robotic and Image-Guided Surgery*. Elsevier Inc., c 2020.
- [6] HAIDEGGER, T. Autonomy for surgical robots. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics* 1, 2 (2019), 65–76.
- [7] HIGGINS, R. M., AND GOULD, J. C. Clinical applications of robotics in general surgery. *Handbook of Robotic and Image-Guided Surgery* (2020), 211–221.
- [8] JARA, R. D., GUERRÓN, A. D., AND PORTENIER, D. Complications of robotic surgery. *Surgical Clinics of North America* c 2019, 461–468.
- [9] OSHIMA, R., TAKAYAMA, T., OMATA, T., KOJIMA, K., TAKASE, K., AND TANAKA, N. Assemblable three-fingered nine-degree of freedom hand for laparoscopic surgery. *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2009).
- [10] PALEP, J. Robotic assisted minimally invasive surgery. *Journal of Minimal Access Surgery* 5, 1 (2009).
- [11] PANESAR, S., CAGLE, Y., CHANDER, D., MOREY, J., FERNANDEZ-MIRANDA, J., AND KLIOT, M. Artificial intelligence and the future of surgical robotics. *Annals of Surgery* 270, 2 (2019), 223–226.

- [12] RYU, J., JOO, H., AND WOO, J. The safety design concept for surgical robot employing degree of autonomy. *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)* (2017), 1918–1921.
- [13] SHAHINPOOR, M., AND GHESHMI, S. *Robotic Surgery*. CRC Press, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742, c2015.
- [14] SHEETZ, K. H., CLAFIN, J., AND DIMICK, J. B. Trends in the adoption of robotic surgery for common surgical procedures. *JAMA Network Open* 2020 (2020).
- [15] SOKHANVAR, S., DARGAHI, J., NAJARIAN, S., AND ARBATANI, S. *TACTILE SENSING AND DISPLAYS*. John Wiley & Sons Ltd, c 2013.
- [16] THOMAS, L., AND COVENEY, S. Recent advances in robotic surgery. *News Medical Life Sciences*.
- [17] YANG, G.-Z. Medical robotics—regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. *Sci. Robotics* 2, (2017).