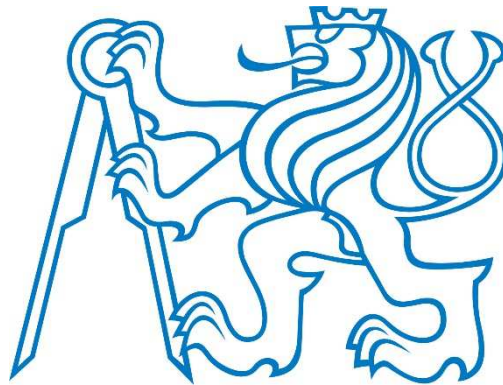


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jak pracuje robotický vysavač

Autor: Petr Seidel

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Novák Ph.D.

Praha 2016

Vysoká škola: ČVUT v Praze

Fakulta: strojní

Pracoviště: Ústav přístrojové a řídicí techniky

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

jméno:

Petr SEIDEL

program:

Teoretický základ strojního inženýrství

Název tématu: **Jak pracuje robotický vysavač**

Název anglicky: How does a robotic vacuum cleaner work

Zásady pro vypracování:

Zpracujte rešerši na téma „Jak pracuje robotický vysavač“.
Vyhledejte informace o:

- používaných senzorech a jejich principech
- akčních členech
- algoritmech řízení

Rozsah grafických prací: max. 50 %

Rozsah práce: 20 - 25 stran

Seznam užitých literatury:

- [1] BEKEY, G.: Autonomous Robots - From Biological Inspiration to Implementation and Control, MIT University Press, 2005, ISBN 9780262025782
[2] WOODFORD, CH.: Roomba® robot vacuum cleaners, online
<<http://www.explainthatstuff.com/how-roomba-works.html>>, přístup 8.4.2016

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Martin Novák Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 12. 4. 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. 6. 2016

J. Chyský

doc. Ing. Jan Chyský, CSc.
vedoucí ústavu



M. Valášek

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne: 6. 4. 2016

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor. Dále prohlašuji, že všechny použité prameny jsou citovány.

V Praze dne

.....

Podpis

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou robotických vysavačů. V práci jsou popsány používané senzory a akční členy. Práce je dále zaměřena na orientaci robotických vysavačů v prostoru a navigaci. Zahrnuty jsou kamerové navigační systémy, mapování prostředí pomocí laseru, technologie pro lokalizaci robotického vysavače využívající infračervené světlo. Zmíněny jsou i algoritmy řízení a pohybu. Práce také pojímá dokování robotických vysavačů.

KLÍČOVÁ SLOVA

robotický vysavač, senzory, akční členy, orientace, navigace, SLAM, mapování, laser, vnitřní GPS, dokovací stanice

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with issues of robotic vacuum cleaners. The thesis describes used sensors and actuators. The work is further focused on the orientation of robotic vacuum cleaners within the working area and navigation. Visual mapping and navigation, a distance measuring system and method employing laser, IR navigation system are included. There are also mentioned control algorithms and motion control. The thesis also contains mating robotic vacuum cleaners with a base station.

KEYWORDS

robotic vacuum cleaner, sensors, actuators, orientation, navigation, SLAM, mapping, laser, internal GPS, base station

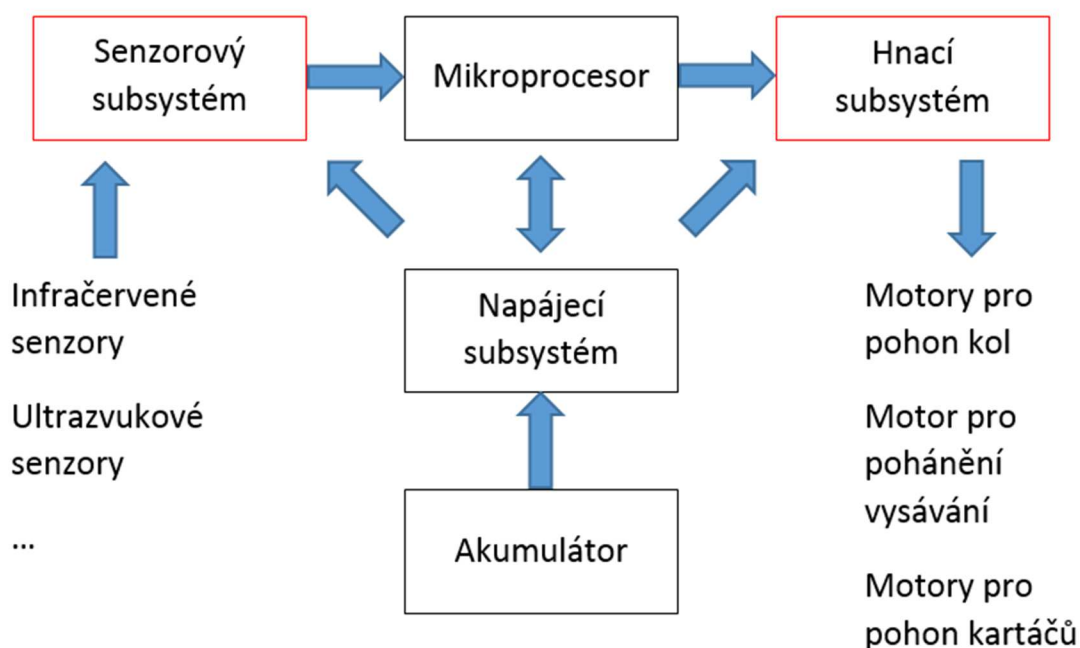
OBSAH

1 ÚVOD.....	7
1.1 CÍL PRÁCE	7
1.2 ROBOTICKÉ VYSAVAČE	7
2 POUŽÍVANÉ SENZORY.....	9
2.1 ULTRAZVUKOVÉ SENZORY.....	10
2.2 INFRAČERVENÉ SENZORY	11
3 AKČNÍ ČLENY.....	12
4 ORIENTACE V PROSTORU, NAVIGACE	13
4.1 KAMEROVÉ NAVIGAČNÍ SYSTÉMY.....	13
4.2 MAPOVÁNÍ PROSTORU POMOCÍ LASERU	16
4.3 VNITŘNÍ GPS.....	20
4.4 DOKOVÁNÍ.....	24
5 ALGORITMY POHYBU	27
6 ZÁVĚR	28
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	30
SEZNAM OBRÁZKŮ	32

1 ÚVOD

1.1 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je vypracovat rešerši zabývající se problematikou robotických vysavačů. Mojí snahou bude popsat, jak takové vysavače pracují a fungují. Dále se pokusím vyhledat informace o používaných senzorech. Zmíním i akční členy a algoritmy řízení. Významná část práce se zaměří na orientaci robotického vysavače v prostoru, navigaci a algoritmy pohybu. V práci se omezím pouze na některé části a komponenty robotického vysavače (viz obrázek 1 a jeho zvýrazněné bloky). Při zpracovávání rešerše budu mnohdy čerpat z různých patentů od výrobců robotických vysavačů. Jako zdroj inspirace poslouží také náš domácí iRobot Roomba 563 Pet, který budu často zmiňovat.



Obrázek 1: Zjednodušené blokové schéma robotického vysavače

1.2 ROBOTICKÉ VYSAVAČE

Pod pojmem robotický vysavač se převážně rozumí plně automatický domácí vysavač. Takový vysavač se mechanicky pohybuje a pomocí podtlaku zbavuje podlahy

drobných nečistot. Od standardního vysavače se liší tím, že pracuje samostatně na základě různých algoritmů. Tudíž nevyžaduje přílišnou lidskou asistenci a řadí se tak k domácím autonomním robotům. Robotické vysavače jsou typicky nízko profilové a kompaktní. Nejčastěji mívají tvar disku s průměrem okolo 30 cm a hmotnost nepřesahující 4 kg. Výška většinou nepřekračuje hodnotu 10 cm. V porovnání s klasickými vysavači dosahují robotické vysavače menšího sacího výkonu. Robotické vysavače bývají napájeny akumulátorovými zdroji. Běžný robotický vysavač se dále skládá z různých rotačních kartáčů, sběrné nádoby na smetí, akčních členů v podobě pohonných jednotek a velkého počtu senzorů. Nedílnou součástí také tvoří dokovací neboli nabíjecí stanice.



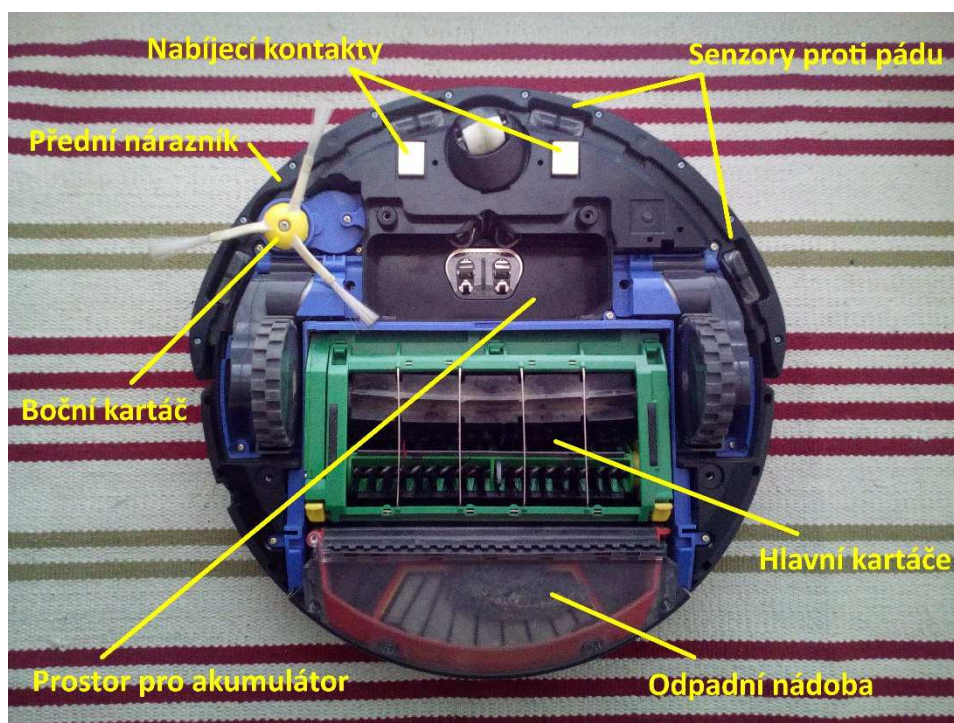
Obrázek 2: Robotický vysavač iRobot Roomba 563 Pet

Robotické vysavače se objevily už v devadesátých letech 20. století. Prvním sériově vyráběným typem byl vysavač Trilobite od švédské společnosti Electrolux [1]. V dnešní době se robotické vysavače vyznačují vyšší dostupností i nižší cenou. Smyslem používání robotického vysavače je hlavně vykonávání každodenního čištění podlahy mezi pravidelnými úklidy tradičním vysavačem. Vývoj robotických vysavačů jde neustále kupředu a procento pokrytí podlahové plochy se již blíží téměř 100%. Mezi nejznámější výrobce robotických vysavačů patří společnosti iRobot, Neato Robotics, Ecovacs Robotics, Miele, Yujin Robot, LG, Samsung.

- **iRobot Roomba 563 Pet**

Vysavač iRobot Roomba 563 Pet ze série 500 je třetí generací robotických vysavačů, která byla uvedena roku 2007 [2]. Výrobcem je americká společnost iRobot. Pohyb robotu je umožněn díky dvěma kolům, přičemž každé kolo je poháněno samostatným elektrickým motorem. Tím je zajištěna schopnost zatáčení a otáčení se. Jako zdroj energie zde slouží NiMH akumulátor [3].

Boční kartáč, který vyčnívá mimo obrys vysavače, je určen k vymetávání nečistot od překážek. Dvojice hlavních protiběžných kartáčů slouží ke sbírání nečistot, které se vysávají přímo do odpadní nádoby. Ve vysavači nechybí ani prachový filtr [4].



Obrázek 3: iRobot Roomba 563 Pet – popis součástí

2 POUŽÍVANÉ SENZORY

Senzory představují pro robotické vysavače důležitou součást, jelikož získávání co největšího objemu dat týkajících se okolního prostředí má v robotice velmi významnou roli. Senzory jsou podstatné především pro efektivitu práce robotických vysavačů a napomáhají

určité orientaci vysavače v prostoru. V dnešní době mívají robotické vysavače standardně až desítky nejrůznějších senzorů, které neustále sbírají údaje o okolním prostoru a eventuálních překážkách. V hojném počtu se u robotických vysavačů objevují infračervené a ultrazvukové senzory. Ve vysavačích se mohou vyskytovat i kamery a laserové senzory.

Detekce překážek probíhá různými způsoby. Starší typy robotických vysavačů disponovaly pouze mechanickými senzory dotyku umístěnými v nárazníku. Překážka je při použití těchto snímačů zaregistrována až samotným nárazem [4]. Současné robotické vysavače bývají také vybaveny různými nárazníkovými senzory, které ovšem umožňují lepší detekci překážek. Do nárazníkových senzorů můžeme řadit senzory ultrazvukové, infračervené, dotykové. Jeden ze způsobů například zahrnuje detekci překážek pomocí předního nárazníku se zpomaleným dotykem. Díky infračerveným snímačům v nárazníku vysavač překážku zaregistruje, zpomalí svůj pohyb a lehce se s ní střetne. Přímý kontakt s objekty zvyšuje účinnost bočního kartáče, který může od dané překážky lépe vymést nečistoty [5]. Další způsob spočívá v bezdotykovém rozpoznávání překážek, kdy je zajištěno pomalé přiblížení k překážce a následné vyhnutí se kolizi [6]. Detekce překážek v jízdní dráze může probíhat také pomocí optických senzorů na čelní straně robotického vysavače. V tomto případě je taktéž nárazu do překážky zabráněno [7].

2.1 ULTRAZVUKOVÉ SENZORY

Ultrazvukové senzory snímající široký prostor dokáží robotický vysavač vést a také napomáhají vyhýbání se překážkám. Fungují na principu vysílání a přijímání ultrazvukových signálů. Vyslané signály jsou po odrazu od překážky detekovány senzorem. Časový interval mezi vysláním a přijmutím odraženého signálu poskytuje údaj o vzdálenosti překážky od robotu. Ultrazvukové senzory jsou vcelku levné a snadno dostupné [8].

2.2 INFRAČERVENÉ SENZORY

Infračervené senzory mohou robotickým vysavačům pomáhat například v pohybu podél zdí. V takových případech jsou osazeny infračervenými senzory i boky robotického vysavače. Když přední infračervený senzor detekuje zeď, tak robot začne rotovat, dokud onu zeď nezachytí jeden z postranních senzorů. Každý senzor se skládá z infračervené LED a infračerveného přijímače. Když se robot přibližuje k nějakému předmětu, tak přijímač detekuje odražený infračervený signál a tím je překážka zaregistrována [9].

Většina dnešních robotických vysavačů má k dispozici senzory proti pádu z vyvýšených míst, které bývají umístěny ve spodní části vysavače (viz obrázek 3). Senzory proti pádu dokáží rozpoznat volný prostor pod sebou a zabraňují tak pádu kupříkladu ze schodů. Tyto senzory nepřetržitě vysílají infračervené signály a robot očekává jejich okamžitý odraz zpět [4].

Často bývají robotické vysavače opatřeny funkcí virtuálních zdí. Pomocí této funkce lze robotu zahradit určitý prostor, na kterém nebude operovat. Jedná se o infračervený paprsek, který vysavač pomocí přijímače na nárazníku vyhodnotí jako překážku a tudíž do vymezeného prostoru nevjede. Napájení infračervených zdí bývá zajištěno bateriemi [6].

Některé robotické vysavače od společnosti iRobot disponují funkcí virtuálních majáků. Tato funkce je užitečná při vysávání prostoru členěného na jednotlivé místnosti. Do dveřních prostorů se umísťují tzv. virtuální majáky vysílající infračervené paprsky, které po uklizení jedné místnosti navedou robotický vysavač do další. Robot tímto způsobem postupně projede všemi majáky a vyčistí tak vybrané místnosti [3].

Pomocí optických senzorů dokáží robotické vysavače detekovat nadměrně znečištěná místa. Senzory snímají množství nečistot, které putuje do sběrné nádoby. Při navýšení množství vysavač vyhodnotí dané místo jako více znečištěné a důkladněji se na něj zaměří [5]. Detekce nadměrně znečištěných míst může být zajištěna i piezoelektrickými senzory umístěnými přímo nad hlavními kartáči. Větší množství nečistot proudící přes

kartáče a narážející na senzory způsobuje vznik nadměrného počtu drobných elektrických impulsů [3].

Podobnou funkci jako virtuální zeď zastávají také magnetické pásky, které trvale vymezují prostor určený k vysávání. Páska nad svým povrchem vytváří magnetické pole, na které reagují magnetické senzory vysavače. Příslušné senzory toto pole vyhodnotí jako zakázaný prostor [6].

Technologie zabraňující namotání a zaseknutí kabelů či různých třásní do kartáčů vysavače může fungovat na základě gyroskopických senzorů. Když kartáče zaznamenají odpor, tak změní smysl otáčení [10].

Lasery, které se u některých robotických vysavačů mohou objevit, umožňují robotům detekovat přítomnost různých předmětů. V určitých rozsazích poskytují větší přesnost než ultrazvukové senzory, ovšem za významně vyšší cenu [8].

Mezi další senzory robotických vysavačů se řadí například indikátor plnosti odpadní nádoby, senzor stavu baterie včetně její teploty a akcelerační senzory, které upravují rychlost robotu. Robotický vysavač bývá také schopen diagnostikovat a různými zvukovými signály ohlašovat případné poruchy.

Robotický vysavač LG Hom-Bot umožňuje dle potřeby uživatelskou optimalizaci parametrů. Úpravu parametrů lze provést prostřednictvím USB konektoru. Díky této funkci se může změnit například vzdálenost otáčení vysavače od překážek [11].

3 AKČNÍ ČLENY

Mezi základní akční členy robotického vysavače se řadí především elektrické motory. Jako zdroj energie slouží motorům akumulátory.

Elektrické motory jsou v robotice nejhojněji využívané zdroje točivého momentu pro pohyb nebo manipulaci. Motory bývají velmi často stejnosměrné servomotory. Montovány mohou být také motory krokové [8].

Robotický vysavač iRobot Roomba 563 Pet má hned několik malých motorů. Jedná se o dvojici hlavních motorů pro pohon kol, díky kterým se může robot pohybovat. Je tak umožněn pohyb dopředu, dozadu a zatáčení a otáčení se. Dále je tento robotický vysavač vybaven motorem pro pohánění vysávání a motory pro pohon kartáčů [4].

4 ORIENTACE V PROSTORU, NAVIGACE

Dobrá orientace a pohyb v prostoru představují důležitou vlastnost robotických vysavačů. Pro dosažení vysokého procenta pokrytí podlahové plochy a efektivního úklidu je potřeba jistý navigační systém, který může být realizován například pomocí infračerveného světla, laseru, kamer a dalších senzorů vysavače.

K orientaci mohou robotické vysavače využívat také snímače na kolech, které měří vzdálenost [11].

Navigační systémy, které fungují na základě různých algoritmů, dokáží zmapovat okolní prostor a následně stanovit nejvhodnější trasu pro úklid. To se hodí především pro rozlehlější a více členité prostory. Dosáhne se také jistého zkrácení doby vysávání. Tyto jednotlivé navigační systémy můžeme souhrnně nazvat jako SLAM (Simultaneous localization and mapping). Díky navigačním systémům si mnohé vysavače dokážou zapamatovat místo, kde skončily s úklidem a na stejném místě následně pokračovat. Úloha zapamatování si určitého místa se hodí v případě, kdy má robot nízkou energetickou hladinu akumulátoru a musí se tak během úklidu vrátit do nabíjecí neboli dokovací stanice. Nedochozí k opětovnému vysávání již uklizených míst. Naopak robotické vysavače bez navigačního systému se pohybují zcela náhodným způsobem, a tudíž nemohou dostatečně pokrýt podlahovou plochu [15].

4.1 KAMEROVÉ NAVIGAČNÍ SYSTÉMY

Kamery navigační systémy jsou v dnešní době u robotických vysavačů od různých výrobců vcelku rozšířené. U kamerových navigačních systémů se vzdálenosti robotu od jednotlivých předmětů většinou nepřímo počítají ze získaných obrazových dat z kamer.

Kamerové navigační systémy bývají založené na VSLAM (Vision simultaneous localization and mapping). VSLAM je způsob vytváření mapy okolního prostředí a zároveň sledování vlastní pozice robotu. Mapy se vytvářejí softwarovým hledáním výrazných pixelů. Velmi výrazné jsou například rohy různorodých předmětů. Systém by mohl fungovat na principu frekvenční analýzy obrazu. Sledování vlastní pozice robotu je možné v součinnosti s dalším sensorovým vybavením robotického vysavače. Na základě znalosti vlastní polohy zvládá robotický vysavač vysávat v přímých liniích. Tím zvyšuje účinnost pokrytí podlahové plochy. Kamerové navigační systémy vyžadují pro zpracovávání velkého množství obrazových dat jistý výpočetní výkon [12].



Obrázek 4: Vyhledávání výrazných pixelů. Zdroj: [12]

- **Samsung NaviBot**

Robotický vysavač Samsung NaviBot je vybavený navigačním systémem Visionary Mapping. V podstatě se jedná o zabudovanou širokoúhlou kameru schopnou pořizovat 30 snímků za vteřinu. Robotické vysavače NaviBot fungují na operačním systému Windows CE. Díky systému Visionary Mapping dokáže robot mapovat okolní terén. Dále robot dovede vyhodnotit svou aktuální pozici a určit místa, kde se vyskytují různé překážky a kde je postavena dokovací stanice. To vše zajišťuje efektivní způsob čištění prostoru [10].

- **LG Hom-Bot**

Robotický vysavač LG Hom-Bot od společnosti LG pro změnu disponuje systémem Dual Eye. Tato kamerová technologie automaticky počítá intenzitu světla a fotografuje místnost. Systém se skládá z horní a dolní kamery. Horní kamera snímá rychlostí 30 snímků za vteřinu povrch stropu místnosti. Pořízené snímky jsou průběžně vyhodnocovány a souběžně probíhá lokalizace a mapování prostoru. Dolní kamera představuje optický snímač, který skenuje podlahu, měří vzdálenosti a dokáže rozpoznat různé překážky. Neznámé předměty zaregistrované pomocí ultrazvukových senzorů jsou ukládány do paměti pro budoucí úklid [13]. Robot uklízí prostor po jednotlivých pruzích [11].



Obrázek 5: LG Hom-Bot – umístění kamer. Zdroj: [13]

(vlevo nahoře je znázorněna horní kamera a vpravo dole dolní kamera)

Mezi další výrobce, kteří své robotické vysavače vybavují různými kamerovými navigačními systémy, patří například Miele, Yujin Robot. Společnost Yujin Robot produkuje robotické vysavače iClebo [7], [14].

4.2 MAPOVÁNÍ PROSTORU POMOCÍ LASERU

Lokalizaci a mapování pomocí laseru využívají robotické vysavače Neato Botvac. Dochází ke skenování místnosti laserovým senzorem a přesnému zmapování prostoru i díky dalším sensorům. Vysávání probíhá systematicky a pohyb se uskutečňuje v přímých liniích podle vzoru „tam a zpět“. Robot je navržen ve tvaru „D“, a tudíž se snáze dostane do rohů místnosti a také může uklízet blíže ke stěnám. Vysavač disponuje velkým kartáčem napříč celou svou šířkou [15].



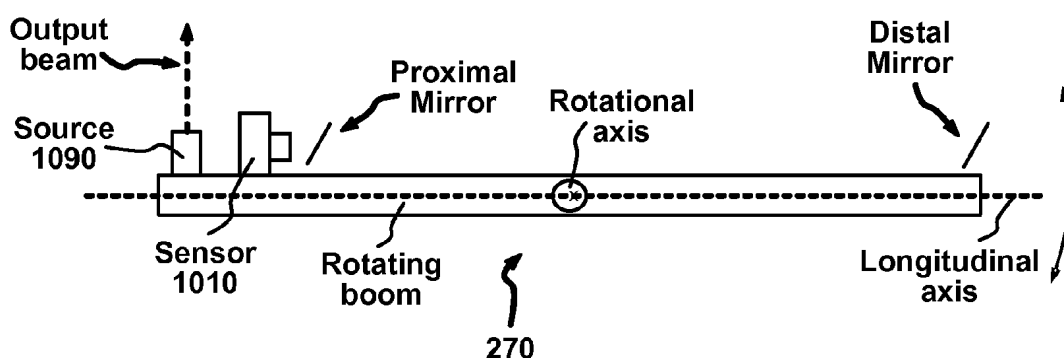
Obrázek 6: Robotický vysavač Neato Botvac 85. Zdroj: [16]

Následující text vychází z patentu **US 8,996,172 B2** (DISTANCE SENSOR SYSTEM AND METHOD), který byl podán v roce 2007 společností Neato Robotics. Udělen byl v roce 2015. Tento patent popisuje systém a způsob měření vzdálenosti s využitím laserového senzoru vzdálenosti [17].

Laserový senzor vzdálenosti neboli LDS (Laser distance sensor) se primárně skládá ze zdroje a snímače. Zdroj i snímač bývají většinou namontované na rotačním členu, který rotuje uvnitř pouzdra senzoru. Pouzdro představuje ochranný kryt celého senzoru. Pouzdro může být také osazeno průhledným okénkem, které by nemělo nijak zeslabit světlo o dané frekvenci. Pouzdro je na obrázku 6 znázorněno modrým prvkem na zadní části robotu.

Robotický vysavač musí být kvůli rotačnímu členu vybaven buď dalším motorem, nebo se může využít různých převodových mechanismů provázaných s již existujícími pohony [17].

V jednom z možných uspořádání laserového senzoru vzdálenosti jsou zdroj i snímač na stejné straně rotačního členu v určitých vzdálenostech od osy rotace. V takovém případě jsou nezbytné doprovodné optické prvky v podobě zrcadel. Toto provedení je zobrazeno na obrázku 7 [17].



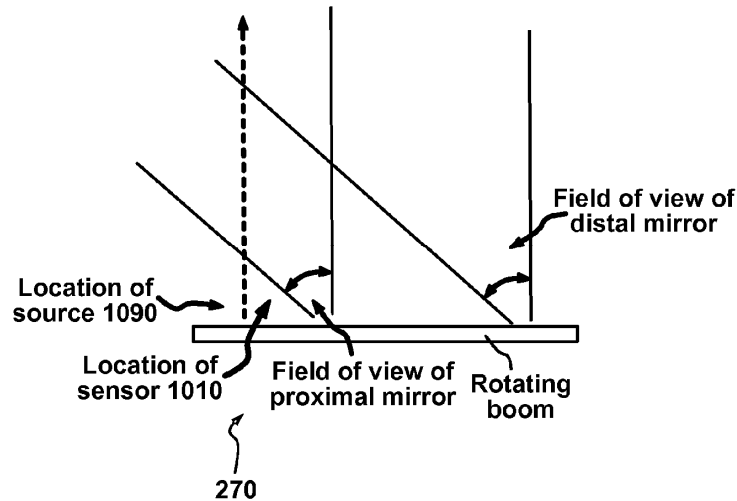
Obrázek 7: Laserový senzor vzdálenosti. Zdroj: [17]

(Hlavní části: 1090 – Zdroj, 1010 – Snímač, Rotating boom – Rotační člen, Rotational axis – Osa rotace, Proximal Mirror, Distal Mirror)

Tyto termíny se vyskytují v textu.

Snímač přijímá odražené paprsky od překážek přes dvojici zrcadel umístěných na rotačním členu. Jedno ze zrcadel se nazývá *Proximal Mirror* (viz obrázek 7) a nachází se poblíž snímače. Toto zrcadlo slouží k detekci blízkých předmětů. Druhé zrcadlo umístěné na protilehlém konci rotačního členu za osou rotace, které je určeno pro detekci vzdálenějších objektů, je označované jako *Distal Mirror* [17].

Pro výpočet vzdálenosti bývá použito světlo ze zrcadla, které má lepší pohled na konkrétní objekt. Když objekt leží v oblasti, kde se zorná pole obou zrcadel překrývají, tak tento objekt zaznamenají obě zrcadla a může být vypočítána průměrná vzdálenost. Zorná pole jednotlivých zrcadel jsou na obrázku 8 [17].



Obrázek 8: Laserový senzor vzdálenosti – zorná pole zrcadel. Zdroj: [17]

(Hlavní části: *Field of view of proximal mirror* – Zorné pole jednoho zrcadla, *Field of view of distal mirror* – Zorné pole druhého zrcadla)

Tyto termíny se vyskytují v textu.

V tomto provedení je vyžadováno přesné umístění zrcadel, snímače a zdroje. Celou soustavu je také velmi náročné kalibrovat [17].

LDS má srovnatelné schopnosti s většími a dražšími laserovými skenery. LDS dokáže zajistit přesné měření vzdálenosti s krátkou základnou. Ve výše popisaném uspořádání se pod pojmem základna skrývá vzdálenost mezi zdrojem a vzdálenějším zrcadlem. Velikost základny představuje důležitý parametr pro přesnost LDS. Se zvětšující se délkou základny se zvyšuje také přesnost měření [17].

LDS poskytuje data týkající se vzdálenosti k různým předmětům v zorném poli. LDS je schopen v reálném čase získávat údaje až o tisících bodech za vteřinu. Je poskytováno jemné úhlové rozlišení i rozlišení vzdálenosti. Vše funguje ve spolupráci s algoritmy pro lokalizaci a mapování. Přesnost triangulací získaných dat se odvíjí od celkové velikosti senzoru. Laser by měl být bezpečný pro lidské oči a celý systém by měl být schopen fungovat i při standardních světelných podmínkách [17].

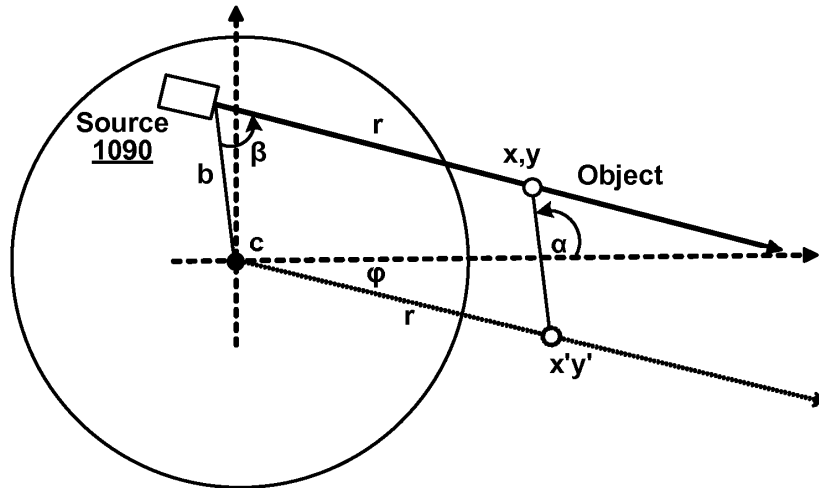
Zdrojem je myšlena laserová dioda. Pro přesnost měření je výhodou vysoce kolimovaný laserový paprsek. Zdroj bývá opatřen různými optickými elementy, jako jsou

čočky a kolimátory. Díky rotaci základny je umožněn rozsah plných 360 stupňů kolem robotu. Základna a tím pádem i zdroj může neustále rotovat kolem osy rotace, nebo může směřovat pouze do určité oblasti. V jistých provedeních může být výstup ze zdroje emitován i jako rovina, přičemž se na povrchu objektu (například zdi) promítne jako svíslá čára. Zdroj může pracovat permanentně a produkovat tak spojitý paprsek. Případně může zdroj poskytovat pulzující signál [17].

Jako snímač může být použit například CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor) senzor, CCD (Charge-coupled device). Snímač musí být citlivý na stejné frekvenční rozsahy elektromagnetického spektra, jako je výstup ze zdroje [17].

Světlo promítané ze zdroje se odráží od předmětů a je pod určitým úhlem zachyceno snímačem. Když je známa relativní poloha a prostorová orientace zdroje a snímače, tak systém LDS může díky výpočtům vzdáleností určit přesnou pozici vysavače. Vzdálenost je počítána pomocí trigonometrie. Vychází se z kombinace různých faktorů, jako jsou velikost základny, úhel odraženého světla zachyceného snímačem, rychlost robotu, časová prodleva mezi produkcí paprsku ve zdroji a jeho zachycení snímačem. Úhel, pod kterým paprsek vstupuje do snímače, se v průběhu času mění. Úhel závisí na pohybu robotu a rotaci zdroje. Úhel dopadajícího paprsku na citlivý povrch snímače lze měřit na základě identifikace nejjasnějšího pixelu v rámci snímacího povrchu. Snímač provádí vyhodnocování v určitých periodických intervalech. Čím budou intervaly mezi jednotlivými měřeními kratší, tím dokonalejší měření bude [17].

Na obrázku 9 je zjednodušené znázornění rotační geometrie LDS. Zdroj 1090 se nachází mimo osu rotace c . Souřadnice x , y skenovaného objektu (*Object*) vzhledem k pevné soustavě souřadnic s počátkem v ose rotace jsou dány vztahy (1) až (5) [17].



Obrázek 9: Rotační geometrie laserového senzoru vzdálenosti. Zdroj: [17]

Obrázek je popsán v textu.

$$x' = r \cos \varphi \quad (1)$$

$$y' = r \sin \varphi \quad (2)$$

$$\alpha = \pi - \beta + \varphi \quad (3)$$

$$x = (x + b) \cos \alpha \quad (4)$$

$$y = (y + b) \sin \alpha \quad (5)$$

Jiný způsob provedení LDS zahrnuje umístění zdroje a snímače na protilehlých stranách rotačního členu od osy rotace. V tomto případě nejsou potřeba žádná přídavná zrcadla [17].

4.3 VNITŘNÍ GPS

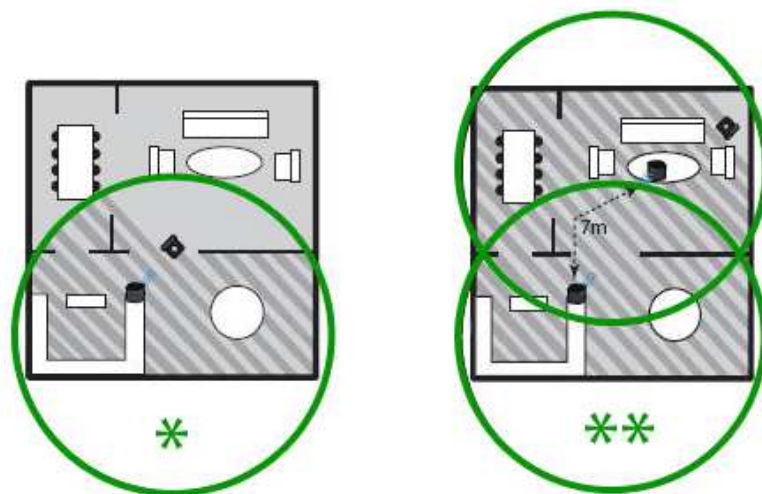
Některé robotické vysavače (například robotické mopy Braava) od výrobce iRobot disponují technologií označovanou jako vnitřní GPS. Vnitřní GPS slouží k lokalizaci robotu v místnosti s využitím infračerveného světla. Nedílnou součástí této technologie představují tzv. projekční neboli navigační kostky NorthStar, které vysílají signál. Jedná se o krychli s délkou hrany asi 6,5 cm. Navigační kostky jsou napájeny bateriemi. Kostka se položí v

místnosti, přičemž na strop promítá dvě infračervené „tečky“ díky kterým se robot orientuje. Je doporučeno kostky pokládat na vyvýšený povrch. Robot se po místnosti pohybuje rovnoběžně. Spolu s daty získanými ostatními senzory vysavače umožňuje systém vnitřní GPS systematický úklid [18], [19].



Obrázek 10: Navigační kostka NorthStar. Zdroj: [20]

Navigační kostky jsou užitečné i při úklidu rozlehlejšího prostoru, kdy se použije více takovýchto kostek, které si mezi sebou robot předávají. Robotický vysavač může zpracovávat současně signál z více navigačních kostek, které musí být na různých kanálech. To umožní zvýšení celkového dosahu robotu. Kostky by se měly umisťovat 6 - 7 metrů od sebe, aby se pokrytí signálem jednotlivých kostek navzájem překrývalo. Robotický vysavač bude poté automaticky čistit prostor pokrytý signálem od jedné kostky k další [21].



Obrázek 11: Příklad použití dvou navigačních kostek. Zdroj: [21]

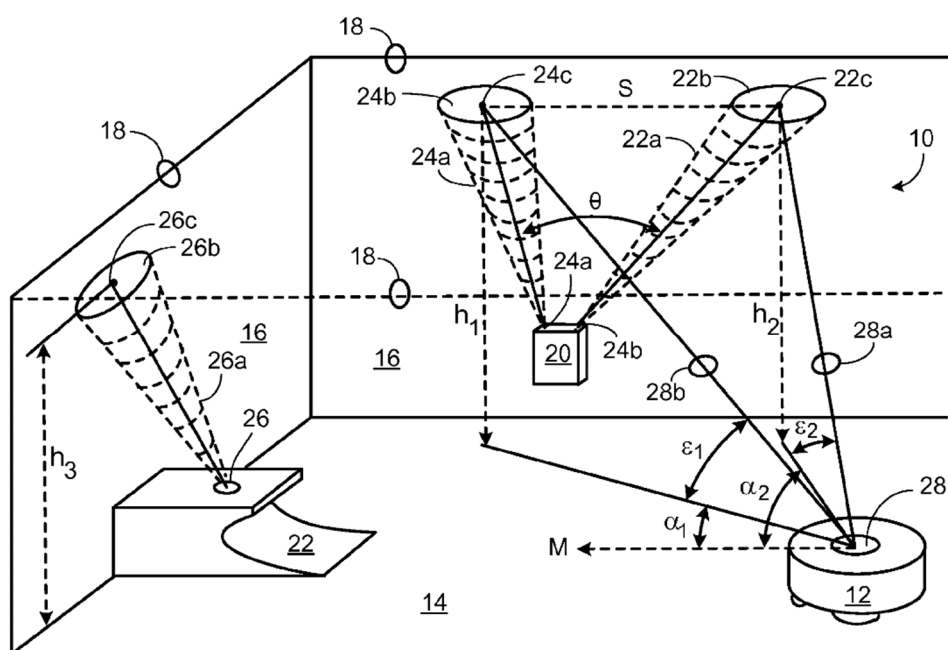
Následující text vychází z patentu **US 9,223,749 B2** (CELESTIAL NAVIGATION SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS VEHICLE), který byl podán v roce 2012 společností iRobot Corporation. Udělen byl v roce 2015. Tento patent popisuje možná provedení navigačního systému robotických vysavačů, který jim umožňuje určení relativní pozice v rámci prostoru, ve kterém operují. Systém je založen na vysílačem vysílaném signálu [22].

Uvedený systém se skládá ze stacionárního zařízení, které vysílá dva infračervené signály. Signály jsou promítány na strop místnosti. Signály ovšem mohou být promítány také na zeď nebo zeď a strop zároveň. Technologie využívá odrazu infračerveného světla. Pro snadnější detekci signálů vysavačem je lepší signály promítat do větších výšek. Bude tak menší pravděpodobnost, že zorné pole přijímače vysavače bude omezeno nějakou překážkou [22].

Jednotlivé signály mohou být modulovány na 10 kHz a kódovány 8-bitovým kódem. To poslouží jako jednoznačná identifikace signálů. Kódované signály mohou být také vysílány po pulzech. Po počátečním synchronizačním pulzu je 100 ms vysílán první signál o frekvenci 10 kHz. Aby vysavač rozpoznal, který signál je přijímán, může vysílač po pulzech vysílat série pěti bitů v délce trvání 10 ms. V pěti bitech jsou obsaženy dva počáteční bity a unikátní 3-bitový identifikátor, který rozliší příslušný signál. Po jisté odmlce vysílač opakuje série pěti bitů pro druhý signál. Po delší časové prodlevě se vysílací sekvence znovu opakuje

od prvního signálu. Rozlišení jednotlivých signálů lze docílit i rozdílnou frekvencí obou signálů [22].

Vysavač, který operuje v daném prostoru, vysílané signály detekuje pomocí přijímače. Přijímač je umístěn na vrchní straně robotu. Je vybaven několika fotodiodami tak, aby byl pokryt dostatečný prostor kolem robotického vysavače. Zorná pole jednotlivých fotodiód se mohou vzájemně překrývat [22].



Obrázek 12: Schematický pohled na systém vnitřní GPS. Zdroj: [22]

(Hlavní části: 24a, 22a, 20, 24c, 22c, h_1 , h_2 , 10, ϑ , S, 28, 12, α_1 , α_2 , ϵ_1 , ϵ_2 , M, 14)

Obrázek je popsán v textu níže.

Signály 24a, 22a vysílané vysílačem 20 jsou na stropě promítány do dvou bodů 24c, 22c. Body určují dvě rovnoběžné přímky h_1 , h_2 se stěnou místnosti 10. Oba signály mezi sebou svírají úhel ϑ . Výška stropu je známa. Tím je také plně určena vzdálenost S mezi body promítnutými na stropě. Poté, co přijímač 28 na robotickém vysavači 12 zachytí signály, tak mikroprocesor robotu určí azimuty signálů α_1 , α_2 a spočítá úhly elevace ϵ_1 , ϵ_2 promítnutých bodů. Azimuty jsou měřeny vzhledem ke směru pohybu robotu M. Na základě signálů je tedy robot schopen jednoznačně určit svoji relativní pozici a orientaci v prostoru 14.

Využívají se k tomu různé triangulační algoritmy založené právě na známé výšce stropu, azimutech a elevačních úhlech jednotlivých bodů. Hodnoty elevací a azimutů spolu s pozicí robotu se ukládají do paměti. To umožňuje vytvořit mapu prostředí, ve kterém robot operuje [22], [23].

4.4 DOKOVÁNÍ

Následující text vychází z patentu **US 9,215,957 B2** (AUTONOMOUS ROBOT AUTO-DOCKING AND ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS AND METHODS), který byl podán v roce 2014 společností iRobot Corporation. Udělen byl v roce 2015. Tento patent popisuje komunikaci robotických vysavačů s dokovací stanicí a schopnost přesného dokování [24].

Dokovací stanice je určena k párování s robotickým vysavačem. Primárně slouží k nabíjení akumulátoru zabudovaného v robotu. Do dokovací stanice se také robot automaticky vrací po dokončení úklidu. Dokovací stanice mohou mít více vysílačů. Dokovací stanice vyzařují signály, díky kterým je bezpečně zamezeno nechtěné kolizi s robotickým vysavačem. Na základě příjmu těchto signálů se také robot při opouštění stanice od stanice vzdaluje. Dále jsou vysílány naváděcí signály umožňující přesné navedení robotu ke stanici a následné dokování neboli spojení elektrických kontaktů vysavače a stanice [24].



Obrázek 13: Dokovací stanice robotického vysavače iRobot Roomba 563 Pet

Jedno z možných provedení dokovací stanice na obrázku 13, kterým disponuje kupříkladu robotický vysavač iRobot Roomba 563 Pet, obsahuje dvojici vysílačů. Jedná se o vrchní a přední. Vrchní vysílač generuje v rozptylové oblasti kolem stanice signál, díky kterému by se měl robot vyhnout kolizi s dokovací stanicí. Vrchní vysílač využívá parabolický reflektor. V takovémto provedení je signál vysílán pomocí LED nasměrované na čočku, jejíž geometrie je určena rotací paraboly kolem ohniska čočky. Tím pádem parabolický reflektor promítá signál pod úhlem 360 stupňů kolem dokovací stanice. Podobná konfigurace může být použita i na snímači vysavače (viz obrázek 14). Naváděcí signály jsou vysílány pomocí dvou emitorů v předním vysílači. U některých provedení se oba naváděcí signály navzájem překrývají. Trasa vysavače při dokování je poté definována místy s překryvem signálů [24].

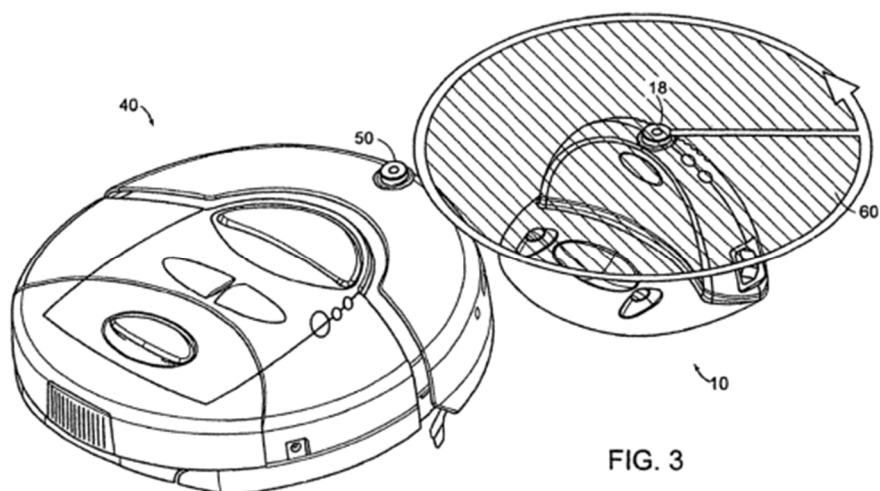
Pro robotický vysavač je klíčová předozadní osa, která definuje směr pohybu vpřed. Tato osa je shodná s předozadním průměrem robotu. Na této ose je umístěn také vrchní senzor robotického vysavače [24].



Obrázek 14: Snímač signálů z dokovací stanice na robotickém vysavači iRobot Roomba 563 Pet

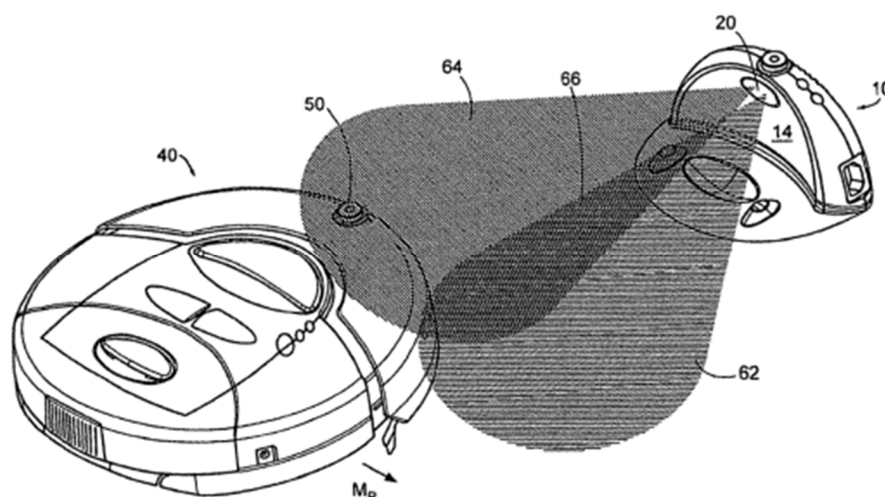
Snímač robotického vysavače bývá umístěn na nejvyšším bodě vysavače. V různých provedeních mohou být na robotu instalovány jeden nebo dva snímače. Snímačem může být klasický infračervený snímací modul, který obsahuje fotodiodu ve spojení se všesměrovým objektivem (čočkou) pro jednu rovinu. Robot bývá většinou schopen rozlišovat mezi signály, které jsou generovány více vysílači. V určitém provedení mohou být použity na robotech jako snímače infračervené fototranzistory. Poté se měří intenzita infračerveného světla, která poskytne přibližný údaj o vzdálenosti mezi robotickým vysavačem a zdrojem v podobě dokovací stanice. V jiném provedení může snímač fungovat jako detektor gradientu intenzity. Jelikož je snímač namontován v přední části robotu, tak detektor vždy zachytí zvyšující se intenzitu záření. Tato metoda gradientu intenzity může být využita také ke hledání zdroje signálu [24].

Radiální rozsah signálu pro vyhnutí se dokovací stanici (všesměrový infračervený paprsek v jedné rovině) může dosahovat až několik metrů od stanice. Pokud snímač na robotickém vysavači detekuje měřitelnou hladinu infračerveného signálu pro vyhnutí se, tak může robot začít rotovat na místě, dokud signál neklesne pod detekovatelnou úroveň. V určitých provedeních je jako zdroj tohoto signálu užíván kolimovaný infračervený emitor. V tomto případě jsou paprsky modulovány na frekvenci 38 kHz. Všechny signály jsou kódované. Signálů pro vyhnutí se lze využít i v případě, když se robot snaží stanici vyhledat. Robot je schopen kroužit kolem stanice, dokud nezachytí naváděcí signály [24].



Obrázek 15: Signál pro vyhnutí se dokovací stanici. Zdroj: [24]

Ve větších místnostech je pro efektivnější nalezení dokovací stanice vhodnější, aby byly naváděcí signály delší. Naváděcí signály mohou dosahovat až několik metrů od dokovací stanice. Úhlová šířka naváděcích signálů se může v různých aplikacích lišit. Robot vykonává dokování s vysokou přesností a opakovatelností. Oba naváděcí signály mohou být navzájem odlišeny pomocí jiných vlnových délek nebo nosných frekvencí. Robotický vysavač se při dokování snaží mít vždy jeden naváděcí signál po pravé straně a druhý signál po levé straně. Dokování je možné až když se oba signály navzájem překryjí. Pro úspěšné dokování je důležité, aby oblast překryvu obou signálů byla co možná nejtenčí. Při finálním přibližování k dokovací stanici může robotický vysavač snížit svoji rychlost a přerušit vysávání [24].



Obrázek 16: Naváděcí signály dokovací stanice. Zdroj: [24]

5 ALGORITMY POHYBU

Existuje několik nejpoužívanějších přístupů k navigační strategii robotických vysavačů pro pokrytí plochy určené k vysávání [9].

Patří mezi ně například náhodný pohyb. Při náhodném pohybu se robotický vysavač pohybuje po místnosti zcela nahodile. Jedná se sice o levnější způsob provedení, ale úklid bude značně neefektivní a časově náročný. Po detekci překážky se robot začne od dané překážky vzdalovat v náhodném směru. Nový směr pohybu může být kupříkladu vybrán na

základě Gaussova rozdělení pravděpodobnosti. Tento model pohybu bývá také označován jako náhodný odraz [9], [24], [3].

Dalším přístupem je pohyb podle předem naplánované trasy po zmapování okolního prostředí. V tomto případě se převážně využívá technologií založených na SLAM (Simultaneous localization and mapping). Robot je schopen velmi efektivního a systematického úklidu. Většinou se robotický vysavač pohybuje napříč prostorem rovnoběžnými tahy [9], [3].

Jako další přístup lze označit pohyb podle jistých předdefinovaných schémat chování. Mezi hlavní vzory pohybu se řadí následování překážek, spirální pohyb, pohyb po přímkách. Vzor následování překážek zajistí, že je robot schopen pohybu například po obvodu místnosti podél stěn. Spirální pohyb se vyznačuje pohybem robotu po spirálách směrem ven nebo dovnitř. Robotický vysavač může vykonávat jednotlivé režimy pohybu po předepsaný čas či ujetou vzdálenost. Změna režimu pohybu může nastat také jako reakce na nějakou překážku [9], [24].

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce měla za cíl vypracování rešerše zabývající se problematikou robotických vysavačů. Úkolem bylo popsat, jak takové vysavače pracují a fungují. Postupně byly popsány používané senzory a jejich principy, akční členy, orientace robotických vysavačů v prostoru, navigace. Ke konci práce jsou zmíněny různé algoritmy pohybu. Největší část práce se věnuje právě orientaci vysavačů a jejich navigačním systémům včetně dokování. Zahrnutý jsou kamerové navigační systémy, mapování prostředí pomocí laseru, technologie pro lokalizaci robotického vysavače využívající infračervené světlo neboli vnitřní GPS.

Při práci bylo čerpáno z několika patentů, které se věnovaly různým navigačním systémům. Velkou inspirací byl náš iRobot Roomba 563 Pet, který posloužil i jako zdroj některých obrázků. Byla snaha vztahovat jednotlivé informace právě k tomuto robotickému vysavači. Například při popisu dokování robotických vysavačů jsem vycházel z provedení, které využívá iRobot Roomba 563 Pet.

Robotické vysavače se v dnešní době těší vcelku velké popularitě. Je to dáno především jejich dostupností. Navíc se objevují i další robotická zařízení, jako jsou robotické mopy, čističe okapů, roboty určené k čištění (vysávání) bazénů, robotické sekačky. Dnes již drtivá většina nabízených robotických vysavačů disponuje nějakým navigačním systémem. Využití technologie mapování prostoru pomocí laseru v robotických vysavačích za přijatelnou cenu považuji za jeden z průlomů ve vývoji robotických vysavačů. Současné snahy vedou ke zvyšování procenta pokrytí podlahové plochy. Do budoucna se bude zřejmě vývoj robotických vysavačů ubírat směrem k úplnému minimalizování potřeby lidské asistence. Dá se předpokládat, že jednou robotické vysavače zcela nahradí ty klasické, které již nebudou potřeba.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Robot cleaner hits the shops* [online]. 2003 [cit. 2016-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/technology/3031219.stm>>.
- [2] Ricadela, Aaron. *Tidying Up the New Roomba* [online]. 2007 [cit. 2016-04-12]. Dostupný z WWW: <https://web.archive.org/web/20110915171122/http://www.businessweek.com/technology/content/aug2007/tc20070821_419619.htm?technology+product+review>.
- [3] Woodford, Chris. *Roomba® robot vacuum cleaners* [online]. 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.explainthatstuff.com/how-roomba-works.html>>.
- [4] Layton, Julia. *How Robotic Vacuums Work* [online]. 2005 [cit. 2016-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/home/robotic-vacuum.htm>>.
- [5] *Slovník pojmů iRobot* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.irobot.cz/slovník-pojmu.html>>.
- [6] *JAK FUNGUJE ROBOTICKÝ VYSAVAČ ECOVACS?* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.ecovacs.cz/jak-funguje/jak-funguje-roboticky-vysavac-ecovacs.aspx>>.
- [7] *Robotické vysavače Miele* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.miele.cz/domacnost/roboticky-vysavac-2776.htm>>.
- [8] BEKEY, G.: *Autonomous Robots - From Biological Inspiration to Implementation and Control*, MIT University Press, 2005, ISBN 9780262025782
- [9] Chih-Hao Chen a Kai-Tai Song, "Complete coverage motion control of a cleaning robot using infrared sensors," IEEE International Conference on Mechatronics, 2005. ICM '05., Taipei, 2005, pp. 543-548. doi: 10.1109/ICMECH.2005.1529316
- [10] *Samsung NaviBot – robotický vysavač s kamerovým systémem* [online]. 2010 [cit. 2016-05-09]. Dostupný z WWW: <http://sdeleni.idnes.cz/samsung-navibot-roboticky-vysavac-s-kamerovym-systemem-pkv-/tec_sdeleni.aspx?c=A100521_140122_tec_sdeleni_ahr>.

- [11] Dřínek, Milan. *Úklid není žádná věda aneb jak na optimalizaci robotického vysavače* [online]. 2014 [cit. 2016-05-09]. Dostupný z WWW: <<http://vyvoj.hw.cz/trendy/uklid-neni-zadna-veda-aneb-jak-na-optimalizaci-robotickeho-vysavace.html>>.
- [12] Ackerman, Evan a Erico Guizzo. *iRobot Brings Visual Mapping and Navigation to the Roomba 980* [online]. 2015 [cit. 2016-05-30]. Dostupný z WWW: <<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/home-robots/irobot-brings-visual-mapping-and-navigation-to-the-roomba-980>>.
- [13] *LG Hom-Bot* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.lg.com/cz/vysavace/lg-VR62601LVM>>.
- [14] *iCLEBO Arte* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.iclebo.cz/iclebo-arte.html>>.
- [15] *Neato Robotics Announces Botvac™ – the Most Powerful, Intelligent and Stylish Home Robot Available Anywhere* [online]. 2014 [cit. 2016-06-02]. Dostupný z WWW: <<https://neatorobotics.com/press/neato-robotics-announces-botvac-the-most-powerful-intelligent-and-stylish-home-robot-available-anywhere/>>.
- [16] Botvac™ 85 [online]. [cit. 2016-06-02]. Dostupný z WWW: <<https://www.neatorobotics.com/robot-vacuum/botvac/botvac-85/>>.
- [17] NEATO ROBOTICS. *DISTANCE SENSOR SYSTEM AND METHOD*. US 8,996,172 B2 United States Patent. Uděleno 31. 3. 2015. Zapsáno 19. 7. 2007. Dostupné také z: <http://patft.uspto.gov/>
- [18] *iRobot Braava: robotický mop od specialisty na robotiku* [online]. 2013 [cit. 2016-06-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.irobot.cz/tiskove-zpravy/irobot-braava-roboticky-mop-od-specialisty-na-robotiku.html>>.
- [19] Lutonský, Marek. *Test vytíracího robota iRobot Braava 380: cizí práce nebolí* [online]. 2013 [cit. 2016-06-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.dama.cz/domacnost/test-vytiraciho-robota-irobot-braava-380-cizi-prace-neboli-23471>>.

[20] *NorthStar® Navigation Cube – Channel 2* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupný z WWW: <<http://store.irobot.com/northstar-navigation-cube-channel-2/product.jsp?productId=22181596>>.

[21] *How to Set Up Two NorthStar Navigation Cubes (Two Cubes)* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupný z WWW: <http://homesupport.irobot.com/app/answers/detail/a_id/6124/related/1>.

[22] IROBOT CORPORATION. *CELESTIAL NAVIGATION SYSTEM FOR AN AUTONOMOUS VEHICLE*. US 9,223,749 B2 United States Patent. Uděleno 29. 12. 2015. Zapsáno 31. 12. 2012. Dostupné také z: <http://patft.uspto.gov/>

[23] *iRobot Celestial Navigation System* [online]. 2010 [cit. 2016-04-25]. Dostupný z WWW: <http://robotbg.com/news/2010/09/30/irobot_celestial_navigation_system>.

[24] IROBOT CORPORATION. *AUTONOMOUS ROBOT AUTO-DOCKING AND ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS AND METHODS*. US 9,215,957 B2 United States Patent. Uděleno 22. 12. 2015. Zapsáno 3. 9. 2014. Dostupné také z: <http://patft.uspto.gov/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Zjednodušené blokové schéma robotického vysavače</i>	7
<i>Obrázek 2: Robotický vysavač iRobot Roomba 563 Pet</i>	8
<i>Obrázek 3: iRobot Roomba 563 Pet – popis součástí</i>	9
<i>Obrázek 4: Vyhledávání výrazných pixelů. Zdroj: [12]</i>	14
<i>Obrázek 5: LG Hom-Bot – umístění kamer. Zdroj: [13]</i>	15
<i>Obrázek 6: Robotický vysavač Neato Botvac 85. Zdroj: [16]</i>	16
<i>Obrázek 7: Laserový senzor vzdálenosti. Zdroj: [17]</i>	17
<i>Obrázek 8: Laserový senzor vzdálenosti – zorná pole zrcadel. Zdroj: [17]</i>	18
<i>Obrázek 9: Rotační geometrie laserového senzoru vzdálenosti. Zdroj: [17]</i>	20
<i>Obrázek 10: Navigační kostka NorthStar. Zdroj: [20]</i>	21
<i>Obrázek 11: Příklad použití dvou navigačních kostek. Zdroj: [21]</i>	22
<i>Obrázek 12: Schematický pohled na systém vnitřní GPS. Zdroj: [22]</i>	23
<i>Obrázek 13: Dokovací stanice robotického vysavače iRobot Roomba 563 Pet</i>	24
<i>Obrázek 14: Snímač signálů z dokovací stanice na robotickém vysavači iRobot Roomba 563 Pet</i>	25
<i>Obrázek 15: Signál pro vyhnutí se dokovací stanici. Zdroj: [24]</i>	26
<i>Obrázek 16: Naváděcí signály dokovací stanice. Zdroj: [24]</i>	27