



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Využití kinect senzoru pro robotické účely

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy
Autor práce: **Šimon Novotný**
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Utilization of kinect sensor for mobile robot control

Bachelor thesis

Study programme: B2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 2612R011 – Electronic Information and Control Systems
Author: **Šimon Novotný**
Supervisor: doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Šimon Novotný**
Osobní číslo: **M15000111**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Využití kinect senzoru pro robotické účely**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s možnostmi využití Kinect snímače mimo herní sféru.
2. Seznamte se s postupy rekonstrukce informace o struktuře lidského těla.
3. Navrhňte vhodná gesta pro základní ovládání mobilního robota.
4. Vytvořte aplikaci pro ovládání mobilního robota v prostředí C#.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **30–40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **Abhijit Jana: Kinect for Windows SDK Programming Guide ISBN: 978-1849692380, Packt Publishing 2012**
- [2] **Andrew Troelsen, Philip Japikse: C sharp 6.0 and the .NET 5 Framework, ISBN: 978-1-4842-1333-9, Apress 2015.**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.**
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Karel Paleček, Ph.D.**
Ústav informačních technologií a elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2018**

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan



Kolář
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.


Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 14.5.2018

Podpis: 

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc. Ing. Josefu Černoorskému, Ph.D. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této práce je zhodnocení využití snímače Kinect v2 pro navigaci a ovládání mobilního robota. Byla provedena rešerše použití hloubkových snímačů a způsobů rekonstrukce informace o struktuře lidského těla. Vzhledem k ukončené výrobě senzoru Kinect byla provedena rešerše alternativních hloubkových snímačů a softwarových řešení. Pro demonstraci využití senzoru v oblasti mobilní robotiky byla vytvořena aplikace umožňující zobrazit data ze snímače, detekovat v nich překážky a vytvořit mapu okolí robota. V závěru práce jsou zhodnoceny vlastnosti snímače a některé jeho nevýhody při použití pro robotické účely.

Klíčová slova: Kinect, hloubkové snímače, lokalizační systémy, rozpoznávání gest

Abstract

The main aim is to evaluate the use of the Kinect V2 sensor for mobile robot navigation and control. Search was made for the use of depth sensors and body tracking methods. Since the production of the Kinect sensor was stopped, a search of alternative depth sensors and software solutions was made. To demonstrate the use of the sensor for mobile robotics, an application was created. This application can display raw sensor data, detect obstacles and create a map of the robot's surroundings. The sensor is then evaluated and some of its disadvantages when used for robot navigation are listed.

Key words: Kinect, depth sensors, localization systems, gesture recognition

Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Využití hloubkových senzorů	12
2.1.	Použití pro navigaci robotů	12
2.1.1.	Techniky absolutní lokalizace	12
2.1.2.	Techniky relativní lokalizace.....	14
2.2.	Bezpečnost	15
2.3.	Interakce člověka se strojem	15
2.3.1.	Postupy rekonstrukce informace o struktuře lidského těla	17
3.	Senzor Kinect v2.....	18
3.1.	Hardware	18
3.2.	Software	19
3.2.1.	Rekonstrukce informace o struktuře lidského těla.....	20
3.2.2.	Rozpoznávání gest	21
3.3.	Zajímavé způsoby využití senzoru.....	21
4.	Alternativní senzory.....	23
4.1.	Alternativní hardware.....	23
4.2.	Alternativní software.....	26
5.	Aplikace pro ovládání robota.....	28
5.1.	Uživatelské rozhraní.....	28
5.2.	Data poskytovaná senzorem.....	29
5.3.	Struktura aplikace.....	29
5.3.1.	Připojení k senzoru	30
5.3.2.	Zpracování hloubkových dat	30
5.3.3.	Vizualizace postav	32
5.3.4.	2D mapa povrchu	33
5.3.5.	Rozpoznávání gest	33

5.3.6. Vizualizace bodů.....	33
5.4. Použití senzoru k navigaci	34
6. Závěr	36
Použitá literatura	37
Seznam příloh	39

Obrázek 1: Praporková abeceda	16
Obrázek 2: Americká prstová abeceda	16
Obrázek 3: Sledování gest ruky pomocí senzoru Intel RealSense.....	16
Obrázek 4: Rozpoznávání struktury těla člověka [15].....	17
Obrázek 5: Senzor Kinect V2 [2]	18
Obrázek 6: Senzor Kinect V2 [1]	18
Obrázek 7: Rozložení bodů na kostře těla [10].....	20
Obrázek 8: Basler ToF Camera [6].....	23
Obrázek 9: Sick Visionary-T [7]	23
Obrázek 10: Bezpečnostní senzory SICK [14].....	24
Obrázek 12: Senzor D415 [8]	24
Obrázek 11: SR300 Module[8].....	24
Obrázek 13: XYZprinting 3D scanner [17]	25
Obrázek 14: Creative BlasterX Senz3D [16].....	25
Obrázek 15: Sledování rukou ve VR pomocí senzoru Leap Motion [18]	26
Obrázek 16: Rozhraní aplikace.....	28
Obrázek 17: Struktura aplikace.....	29
Obrázek 18: Souřadnicový systém senzoru [10]	30
Obrázek 19: Filtrování bodů překážek.....	32
Obrázek 20: Mapa s postavou.....	33
Obrázek 21: Chybné měření vzdálenosti	34
Obrázek 22: Chybná detekce postavy.....	35

1. Úvod

Obsahem této práce je zhodnocení využitelnosti Kinect senzoru pro robotické účely a návrh aplikace pro ovládání mobilního robota. Pro navigaci robota je třeba znát jeho polohu a mapovat okolní prostředí. Jedním z vhodných řešení jsou hloubkové senzory, které umožní detekovat překážky, rozpoznávat objekty atd. Vhodné skenery byly v minulosti poměrně drahé, příliš velké a těžké. Revoluci způsobila dostupnost RGB-D kamer, jako je například senzor Microsoft Kinect.

Senzor Kinect byl představen v roce 2010 jako periferie pro konzoli Xbox 360, od roku 2011 je dostupná vývojová sada Kinect SDK umožňující propojit senzor k počítači. Senzor byl primárně určený pro herní využití, tedy sledování osob, rozpoznávání gest a identifikace člověka podle obličeje. Díky nízké ceně a dobré kvalitě poskytovaných dat našel senzor využití v mnoha dalších odvětvích. V práci je použitý senzor druhé generace Kinect v2

V první části práce je vypracována rešerše aktuálního využití hloubkových senzorů v průmyslu, zejména pro navigaci autonomních robotů a zajištění bezpečnosti. Dále jsou zpracovány specifikace senzoru, možnosti zpracování poskytovaných dat a možnosti identifikace a rekonstrukce informací o struktuře lidského těla.

Pro zhodnocení použitelnosti dat ze senzoru Kinect v2 byla vytvořena aplikace v prostředí C# umožňující zobrazení těchto dat, detekci překážek a vytvoření mapy prostředí před robotem.

2. Využití hloubkových senzorů

Hloubkové senzory jsou v současné době využívány v mnoha oblastech. Jedno z nejčastějších je průmyslové využití, zejména pro navigaci robotů a zabezpečení. V mnoha dalších oblastech jsou senzory využívány pro rozpoznávání lidí a detekci gest.

2.1. Použití pro navigaci robotů

Autonomně se pohybující roboti jsou ideální řešení logistiky uvnitř budov. Řízení takového robota vyžaduje systém pro absolutní lokalizaci v prostoru a senzory pro sledování okolí v reálném čase.

Navigace ve známém prostředí

Obvyklá je kombinace hloubkového snímače a jedné z metod absolutní lokalizace. Hloubkový snímač se používá pro detekci překážek a dalších nečekaných změn prostředí.

Použitím hloubkového snímače proti obyčejnému senzoru vzdálenosti je možné kromě samotné detekce překážky i na překážku reagovat, například rozpoznat typ překážky, zmapovat okolí a překážku objet, nebo reagovat na gesta člověka.

Navigace v neznámém prostředí

Hloubkové senzory mohou být použity i pro navigaci v neznámém prostředí. Používají se algoritmy SLAM (simultaneous localization and mapping), které vytváří mapu neznámého prostředí a zároveň v něm určují polohu. Obvyklým nasazením hloubkových senzorů je aktuální vývoj samořídících vozidel.

2.1.1. Techniky absolutní lokalizace

Úkolem absolutní lokalizace je určit polohu robota bez ohledu na předchozí měření. Techniky řeší „problém probuzeného robota“ (*wake-up robot problem*), kdy jsou schopné lokalizovat robota bez znalosti jeho polohy po probuzení a „problém uneseného robota“ (*kidnapped robot problem*), kdy dokáží lokalizovat robota po přesunutí, které robot nemůže detekovat.

Pro absolutní a relativní lokalizaci lze použít mnoho různých systémů. Ne všechny techniky jsou vhodné pro použití ve vnitřním prostředí, například satelitní systémy vyžadují přímý výhled na oblohu. V následující kapitole jsou popsány systémy použitelné pro určení polohy ve vnitřních prostředích. Při rešerši byla využita zejména literatura [12] a [13].

Radiové systémy

Radiové systémy se obvykle skládají z aktivních majáků se známou polohou a mobilních přijímačů, které vyhodnocují sílu signálu přijatého od každého majáku a tím určují polohu. Přesnost těchto systémů závisí na počtu dostupných sítí, množství překážek v prostoru, odrazech signálu a dalších faktorech.

WiFi

V mnoha budovách již je nainstalována síť WiFi přístupových bodů a je možné ji použít k určení polohy.

Pro zaměření polohy je třeba příjem signálu od tří a více vysílačů, udávaná přesnost lokalizace je 5-15 m.

Bluetooth

Bluetooth má na rozdíl od WiFi menší dosah vysílačů, vysílače ale mají menší spotřebu energie a umožňují tak dlouhodobé napájení pomocí baterií. Udávaná přesnost lokalizace je až jeden metr.

Další systémy

Mezi další systémy pracující v pásmu UWB (Ultra-Wideband) patří například lokalizační systém pro průmyslová prostředí od firmy Sewio, nebo moduly firmy Decawave kombinující přijímače pro lokalizaci a inerciální senzory.

VLC

VLC (visible light communication) používá speciální LED, které vysílají lidským okem nepozorovatelné pulsy světla. Každý zdroj světla má své unikátní ID a známou polohu. Porovnáním přijímaných signálů je možné určit polohu.

Laserová triangulace

Tato velmi přesná metoda využívá odrazu laserového paprsku od pevně umístěných odrazových ploch. Vysílač a přijímač jsou umístěny na sledovaném robotu. Poloha se určuje měřením úhlu odrazu a vzdálenosti odrazové plochy od vysílače. Typická úhlová přesnost je $0,1^\circ$ a rychlost aktualizace polohy je 10 Hz. Přesnost lokalizace je v řádu milimetrů. Použité lasery jsou obvykle Class1, systémy jsou citlivé na znečištěné prostředí, problémy způsobuje kouř, prach atd.

Bodové a liniové informační prvky

Tyto orientační body jsou detekovatelné pouze v blízkosti robota, například při průjezdu robota nad takovým prvkem.

Bodové prvky dovolují pouze lokalizaci v malém prostoru, ale poskytují přesnou informaci o poloze. Realizovány mohou být pomocí optických značek, čárových kódů, nebo RFID čipů.

Liniové prvky se v praxi používají pro navigaci robotů pohybujících se v průmyslových halách. Robota není třeba absolutně lokalizovat v každém okamžiku, dostatečná je lokalizace pouze na hranách a vrcholech grafu, který linie tvoří. Linie jsou obvykle tvořeny magnetickými, indukčními, nebo barevnými čarami. Výhodou těchto metod je, že nevyžadují zásah do konstrukce pojižděné plochy.

Vizuální lokalizace

Ve známém prostředí lze použít kameru a předem umístěné výrazné značky. Značky jsou rozpoznávány pomocí počítačového vidění, rozpoznání je tedy náročnější na výkon než příjem lokalizačních signálů u jiných metod. Výhodou je snadné umístění pasivních značek.

2.1.2. Techniky relativní lokalizace

Pomocí technik relativní lokalizace lze odhadnout polohu v závislosti na předchozí poloze. Na rozdíl od absolutních metod neumožňují relativní metody zjistit absolutní polohu robota. Je-li ale počáteční poloha známá, můžeme tyto techniky použít pro krátkodobou absolutní lokalizaci. Při delší době ale dochází k součtu chyb a chyba měření se zvyšuje. Při rešerši byla využita literatura [13].

Navigace výpočtem

Metoda odhadování polohy v závislosti na rychlosti, směru pohybu a času od poslední známé pozice. Tato technika akumuluje chyby měření, je proto vhodné ji kombinovat s jinou lokalizační metodou. Navigace výpočtem je základem inerciální navigace.

Odometrie

Odometrie je metoda lokalizace kolového robota založená na základě údajů o otočení kol. Pro měření otočení kol jsou používány rotační enkodéry. Přesnost této metody závisí na použitých enkodérech, typu podvozku a typu kol. Kola musí být umístěna tak, aby se nesmýkala.

Snímkování povrchu

Téměř žádný povrch není úplně hladký. Drobné nerovnosti lze snímat optoelektrickými senzory. Porovnáním po sobě jdoucích snímků lze určit posunutí po povrchu. Princip je používán v počítačových myších. Metoda má stále nevýhodu v akumulaci chyb, proti odometrii ale netrpí prokluzem kol.

Inerciální systémy

Inerciální navigace je metoda odhadu polohy na základě měření zrychlení. Výhodou metody je absolutní nezávislost na vnějším prostředí. Pro fungování metody je potřeba tříosý gyroskop a tříosý akcelerometr.

Kromě akumulačních chyb je metoda náchylná na přesnost senzorů a další rušivé vlivy, zejména gravitace a otáčení Země. Z tohoto důvodu není metoda samostatně použitelná a je nutné ji kombinovat s jiným systémem.

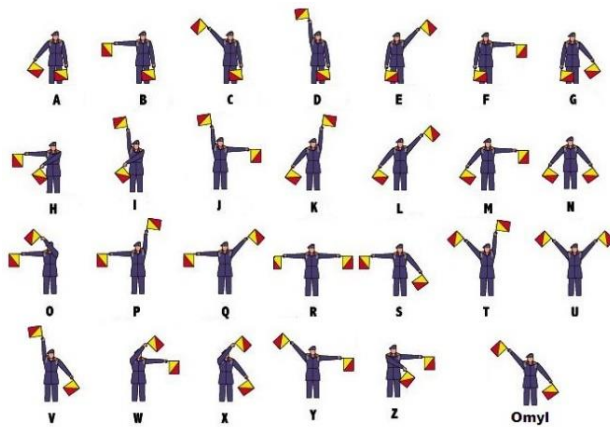
2.2. Bezpečnost

Hloubkové snímače jsou používány pro zabezpečení objektů. Běžné jsou snímače obsazenosti prostoru určené pro zabezpečení průmyslových strojů založené na technologii LIDAR. Skenery umožňují definovat v prostoru zóny a informují o jejich obsazenosti, nejsou obvykle určené pro získávání surových 3D dat o prostoru. Skenery pro průmysl musí splňovat bezpečnostní normy.

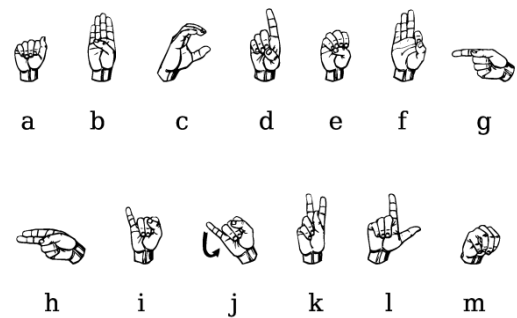
2.3. Interakce člověka se strojem

Jednou z pokročilých oblastí použití hloubkových senzorů je interakce člověka se strojem, zejména detekce polohy člověka a prováděných gest.

Gesta jsou jednou z nejstarších metod lidské komunikace. Dorozumívací systémy založené na signálech tvořených pohybem rukou byly používány již od 17. století. Gesty byla inspirována mechanická návěstidla v dopravě a jsou používána v mnoha dalších činnostech, například pokyny policisty při řízení dopravy, pokyny v letecké dopravě, nebo předávání zpráv praporečnou a prstovou abecedou.

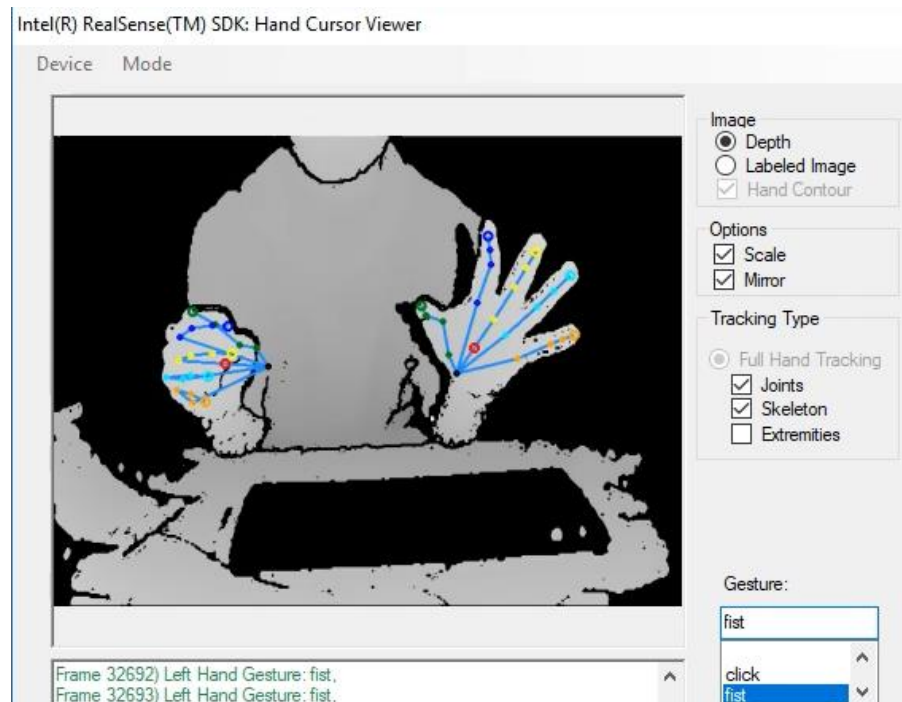


Obrázek 1: Praporková abeceda



Obrázek 2: Americká prstová abeceda

Hloubkové senzory mohou být použity pro detekci gest, a tedy pro přirozenou a intuitivní interakci člověka se strojem. Mezi aktuálně nabízené senzory umožňující sledování prstů rukou patří senzor Leap Motion a senzory technologie Intel RealSense. Tyto technologie dokáží sledovat i jemná gesta rukou, například prstovou abecedu. Senzory Kinect sledují celou postavu, nemají ale dostatečné rozlišení na sledování prstů, je tedy nutné použít výraznější gesta.

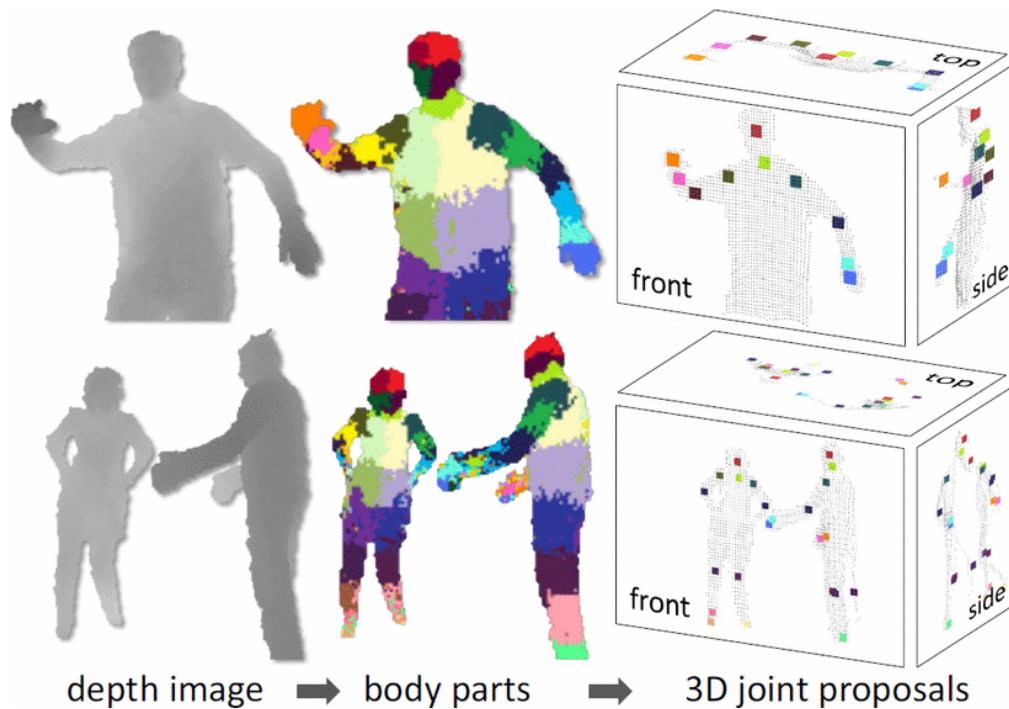


Obrázek 1: Sledování gest ruky pomocí senzoru Intel RealSense

2.3.1. Postupy rekonstrukce informace o struktuře lidského těla

Postupy zpracování surových dat ze senzorů pro rekonstrukci pozice kloubů kostry člověka jsou jedním z hlavních problémů strojového vidění a jsou předmětem aktuálního výzkumu. Všechny metody dosahující použitelné přesnosti využívají strojové učení.

Kinect SDK používá postupy strojového učení popsané v článku [15]. K rozpoznávání jsou použity jednotlivé snímky ze senzoru. Velký objem trénovacích dat umožňuje klasifikátoru detekovat část postavy nezávisle na orientaci, tvaru těla, oblečení atd. Nejprve jsou detekovány jednotlivé části postavy, následně jsou generovány pravděpodobnosti pozic jednotlivých kloubů ve 3D prostoru. Postup rozpoznávání je ilustrován na obrázku 4. Algoritmus je optimalizovaný pro paralelní zpracování, detekce se provádí na jednotlivých pixelech a je využívána akcelerace na grafické kartě.



Obrázek 2: Rozpoznávání struktury těla člověka [15]

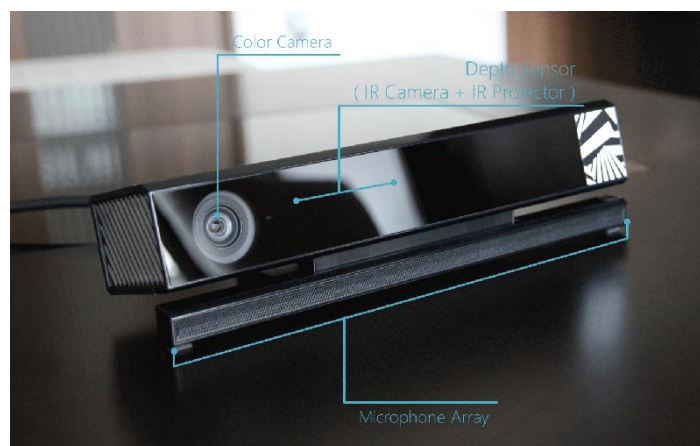
3. Senzor Kinect v2

Senzor Kinect způsobil v roce 2010 revoluci v interakci člověka s počítačem, jednalo se o jeden z prvních cenově dostupných hloubkových senzorů. Kinect v2 je druhou generací senzorů Kinect, proti svému předchůdci má vyšší rozlišení senzorů a jinou technologii snímání hloubky. Tato změna odstraňuje zejména náchylnost na přímé sluneční světlo, která limitovala použití na vnitřní prostory.

Hlavní účel senzoru je určení polohy kloubů lidské postavy, rozpoznávání lidí a hlasových povelů pro ovládání her na konzolích Xbox 360 a Xbox One. Vzhledem k nízké ceně našel senzor po uvolnění SDK využití v mnoha dalších oblastech, například v medicíně a robotice.

3.1. Hardware

Senzor zobrazený na obrázcích 5 a 6 patří do skupiny RGB-D senzorů. Senzor obsahuje RGB kameru, směrové mikrofony, infračervenou kameru a infračervený vysílač.



Obrázek 3: Senzor Kinect V2 [2]



Obrázek 4: Senzor Kinect V2 [1]

RGB Kamera

Kamera má rozlišení 1920 x 1080px, maximální obnovovací frekvenci 30 Hz, v nepříznivých světelných podmínkách frekvence klesá k 15 Hz. Zorné pole je 70 x 60° [3].

Hloubkový senzor

Hloubkový senzor pracuje na principu měření doby letu světelného paprsku. Infračervený emitor přerušovaně osvětluje scénu a světlo odražené od překážek registruje infračervená kamera. Senzor používá vlnovou a fázovou modulaci k určení hloubky každého pixelu. Použití infračerveného emitoru umožňuje funkci senzoru při nepříznivých světelných podmínkách, například silnému protisvětlu, nebo i úplné tmě. Zorné pole senzoru je 46.6 x 58.5°. Senzor pracuje se vzdálenostmi 0,5 – 4,5m a s obnovovací frekvencí 30 Hz. Vzdálenost snímání lze rozšířit až na 8 m, standardně je ale senzor limitován na 4,5m, jelikož na větších vzdálenostech stoupá šum a data nejsou dostatečně kvalitní pro spolehlivou identifikaci osob [3].

Mikrofon

Kinect v2 obsahuje vícesměrovou soustavu mikrofonů umožňující nahrávání zvuku, určení směru, ze kterého zvuková vlna přichází a odhad polohy zdroje zvuku.

3.2. Software

Data ze senzoru lze v současnosti získávat pomocí několika knihoven.

Otevřené knihovny

Knihovny OpenNI a Libfreenect umožňují ze senzoru získávat pouze surová data. Knihovny vytváří komunita a nejsou oficiálně podporované firmou Microsoft. Proti oficiálnímu SDK podporují kromě operačního systému Windows i Linux a Mac OS.

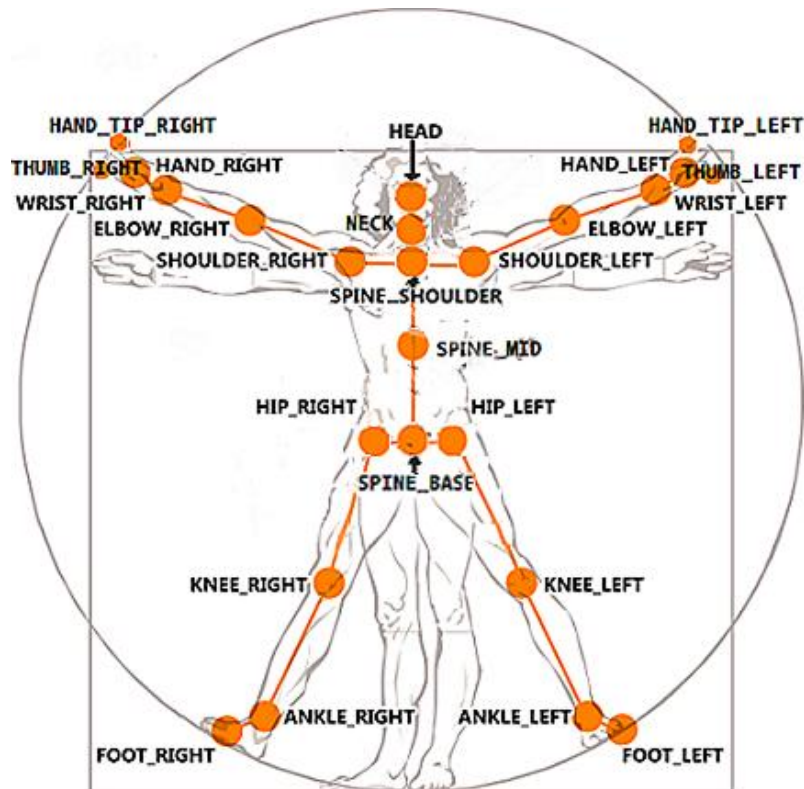
Kinect for Windows SDK2.0

Software Kinect for Windows SDK2.0 je jedinou oficiálně podporovanou možností komunikace se senzorem. SDK podporuje pouze systémy Windows 8 a novější. Stejně jako otevřené knihovny umožňuje přístup k surovým datům ze senzoru, obsahuje ale navíc nástroje pro zpracování těchto dat. Vzhledem k primárně hernímu účelu senzoru jsou tyto nástroje zaměřené na rozpoznávání pohybů člověka: detekce lidské postavy, rozpoznávání gest, identifikace lidí a rozpoznávání hlasových povelů.

V práci byla použita vývojová sada Kinect for Windows SDK2.0, protože nabízí kompletní zpracování dat ze senzoru a také jako jediná podporuje jazyk C#.

3.2.1. Rekonstrukce informace o struktuře lidského těla

Jednou z nejdůležitějších součástí vývojové sady Kinect for Windows SDK2.0 jsou funkce sledování těla v reálném čase. Pro sledování pohybů umožňuje SDK vytvořit kostru lidské postavy, která se skládá celkem z 25 kloubů, jejichž rozložení je zobrazeno na obrázku 7.



Obrázek 5: Rozložení bodů na kostře těla [10]

SDK kromě polohy poskytuje také odhadovanou jistotu detekce každého bodu. Podporováno je sledování až šesti postav zároveň ve standardním režimu, případně dvou postav s detailním sledováním rukou a obličeje. Sledované stavy ruky jsou: otevřená, uzavřená, ukázání dvěma prsty a nesledováno. Mezi sledované stavy obličeje patří úsměv, otevření pusu a otevření očí. Podporována je také identifikace uživatelů podle obličeje a postavy.

3.2.2. Rozpoznávání gest

Kinect for Windows SDK2.0 umožňuje rozpoznávat gesta. Ta mohou být použita pro navigaci, interakci s menu atd. Gesto je sekvence poloh a natočení kloubů rekonstruované postavy člověka. Gesta mohou být definována buď manuálně pomocí specifikace vzájemné polohy několika bodů kostry člověka a její závislosti na čase, případně automaticky pomocí nástroje *Visual Gesture Builder*.

Visual Gesture Builder

Nástroj je určen k tvorbě databáze gest, které jsou následně detekována při běhu aplikace. Používané algoritmy pro detekci gest jsou: *AdaBoostTrigger* – detekční technologie založená na algoritmu strojového učení *Adaptive Boosting* a *RFRProgress* – technologie používající regresní a klasifikační stromy [9].

K definici a vytvoření databáze gest je třeba zaznamenat surová data ze senzoru během provádění gesta a v nástroji označit snímky, na kterých má být gesto detekováno. Nástroj následně vygeneruje databázi gest pro použití v programu.

3.3. Zajímavé způsoby využití senzoru

Senzor Kinect byl navržen pro sledování osob a ovládání her na konzolích Xbox. Díky nízké ceně, relativně vysoké kvalitě poskytovaných dat a dostupnému SDK našel alternativní využití mnoha odvětvích.

3D Skenování

Kinect je možné použít pro vytváření 3D modelů. Jedním z dostupných nástrojů je Microsoft Kinect Fusion pro Kinect, nebo nástroj 3D Scan pro Kinect v2. Nástroje umožňují export do běžných formátů pro 3D objekty [4].

Skenovací nástroje vytvoří geometrii objektu z dat poskytovaných hloubkovou kamerou a texturu ze záběru RGB kamery. Senzor může být při skenování stacionární nebo v pohybu. V případě pohybu je okamžitá poloha senzoru dopočítávána z hloubkových dat.

Rehabilitace

Funkce detekce polohy kloubů postavy je v současné době využívána pro pohybové terapie. Aplikace využívající Kinect poskytuje cvičícímu zpětnou vazbu v reálném čase a hodnotí přesnost prováděných pohybů. Aplikace jsou nejčastěji ve formě her, které

navádějí pacienta k provádění správných pohybů. Záznam z průběhu rehabilitace a jeho analýza umožňuje zpětnou vazbu pro terapeuta i pacienta.

Jedním z aktuálně nabízených řešení je software Jintronix, který nabízí terapeutické hry a poskytuje zpětnou vazbu pro terapeuty.

Robotika

Kinect je využíván jako 3D skener pro mapování okolí robota, detekci překážek a rozpoznávání objektů. Výhoda senzoru proti jiným systémům je nízká cena při zachování vysoké přesnosti a obnovovací frekvence, nevýhodami jsou omezené zorné pole a dosah, nutnost zpracování dat na výkonném počítači a absence certifikací pro použití v průmyslu.

4. Alternativní senzory

Výroba senzoru Kinect byla v roce 2018 ukončena. Technologie jsou dále používány v dalších produktech firmy Microsoft, jako jsou HoloLens, hlasová asistentka Cortana, systém biometrické identifikace Windows Hello a kontextové uživatelské rozhraní. Žádný z těchto produktů ale senzor Kinect plně nenahrazuje a podle vyjádření firmy Microsoft není plánován žádný nástupní produkt [5].

4.1. Alternativní hardware

Vývojářům, kteří budou z hardwaru Kinect odcházet, Microsoft doporučuje, aby posoudili hloubkové kamery Intel RealSense. Dostupné jsou i další alternativy.

Průmyslové RGB-D a LIDAR

Mnoho firem dnes nabízí hloubkové senzory pro použití v průmyslu. Nabízené modely se liší velikostí, odolností a rozlišením. Obvyklé využití je detekce překážek, rozpoznávání objektů a detekce pohybu pro zabezpečení objektů.

RGB-D kamery obvykle data nezpracovávají a předpokládají další zpracování dat na externím zařízení. Mezi aktuálně nabízené modely patří Basler TOF Camera s rozlišením 640 x 480px a Sick Visionary-T s rozlišením 176 x 144px.



Obrázek 6: Basler ToF Camera [6]



Obrázek 7: Sick Visionary-T [7]

Bezpečnostní LIDAR senzory obvykle poskytují data o obsazenosti předem definovaných prostorů a neposkytují surová data. Aktuálně nabízené jsou např. SICK řady S300 a S3000 s dosahem 2-3m a 4-7m.



Obrázek 8: Bezpečnostní senzory SICK [14]

Senzory určené pro PC

Jednou z alternativ senzoru Kinect pro PC jsou senzory Intel RealSense. Intel aktuálně nabízí senzory založené na dvou rozdílných technologiích:

Prvním typem jsou senzory založené na rekonstrukci hloubkových dat pomocí dvou kamer a infračerveného vysílače. V této kategorii Intel nabízí dva snímače: D415 a D435. Oba snímače mají rozlišení hloubkového snímače 1280x720 při 90fps a maximální vzdáleností snímání 10m. Senzory dále obsahují RGB kameru s rozlišením 1920x1080. Senzory se liší v závěrce hloubkového senzoru, D415 má rolující, D435 globální [8].

Druhou technologií je analýza deformace známého obrazce promítnutého na předměty. Aktuálně je v nabídce pouze jeden produkt: SR300 Module. Hloubkový senzor má menší dosah: 0.2 – 1.5m a menší rozlišení: 640 x 480. Senzor je fyzicky menší a je určen pro integraci do dalších zařízení, například mobilního telefonu [8].



Obrázek 9: Senzor D415 [8]

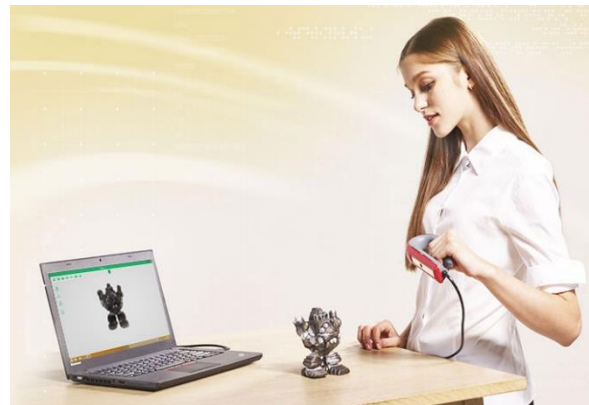


Obrázek 10: SR300 Module[8]

Výše zmíněné kamery vyrábí přímo společnost Intel, technologii RealSense ale také licencuje dalším výrobcům. V nabídce je například senzor Creative BlasterX Senz3D používaný jako webkamera s pokročilými funkcemi zpracování obrazu a pro sledování gest při hraní her, nebo XYZprinting 3D scanner určený pro skenování objektů pro 3D tisk.



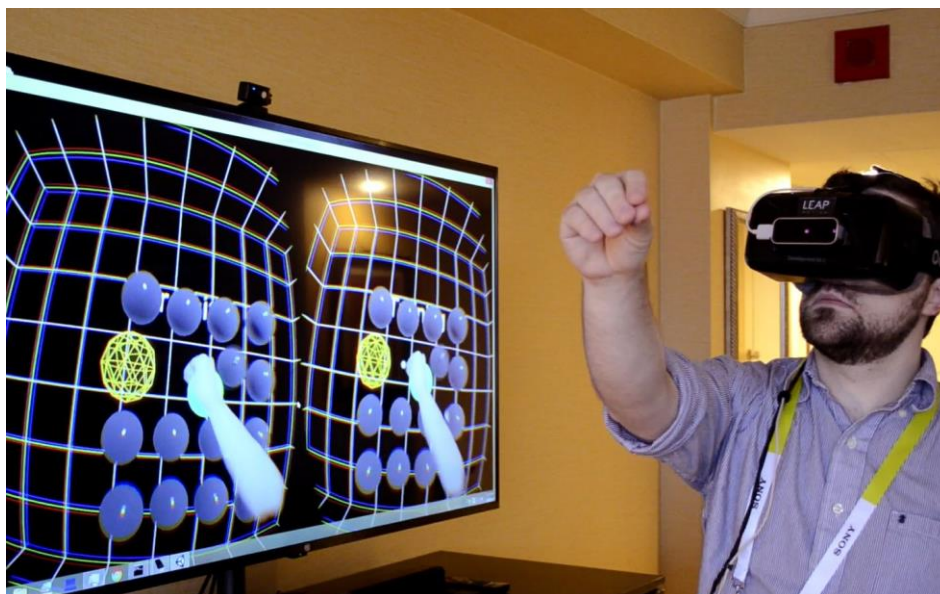
Obrázek 12: Creative BlasterX Senz3D [16]



Obrázek 11: XYZprinting 3D scanner [17]

Senzory Intel RealSense mají jednotné SDK, které umožňuje ovládání aplikací pomocí gest rukou a přihlášení do systému Windows identifikací obličeje uživatele. Senzory mohou fungovat v režimu webkamery s pokročilými efekty, například odstranění pozadí. Podporováno je také rozpoznávání hlasových příkazů pomocí vestavěného mikrofону. Na rozdíl od senzorů Kinect je technologie zaměřena na sledování rukou a SDK nenabízí sledování celé postavy. SDK těchto senzorů také umožňuje přístup k surovým hloubkovým a obrazovým datům.

Další alternativou je technologie Leap Motion. Tyto senzory se zaměřují na přesné sledování rukou, umožňují ovládání kurzoru na počítači a také jsou používány v kombinaci s VR brýlemi. Podporované jsou VR systémy HTC Vive a Oculus Rift, senzor je určen k připevnění na přední stranu brýlí a umožňují sledování rukou bez použití dalších ovladačů.



Obrázek 13: Sledování rukou ve VR pomocí senzoru Leap Motion [18]

4.2. Alternativní software

Některé z výše uvedených kamer podporují detekci postav a rukou přímo ve svém SDK, nicméně existují i softwarové nástroje, které nejsou závislé na hardwaru.

OpenNI

OpenNI je SDK používané k vývoji aplikací zpracovávající hloubková data. SDK je open-source a je distribuované pod licencí Apache 2.0.

Jednou z aplikací využívající OpenNI je knihovna NITE. Knihovna umožňuje rekonstrukci informace a postavě a detekci gest podobně jako Kinect SDK. Podporovány jsou systémy Windows, Linux, Mac OS a Android, knihovna je optimalizována pro procesory x86 a ARM.

Nuitrack

Nuitrack je komerční software zaměřený na zpracování surových 3D dat, umožňuje rekonstrukci informace a postavě a rozpoznávání gest.

Podporovány jsou systémy Android, iOS, Windows a Linux, podporované architektury procesorů jsou x86 a ARMv7. Software není omezen na jeden senzor, podporovány jsou senzory Kinect, senzory firmy Orbbec a senzory postavené na technologii Intel RealSense.

Maximální počet sledovaných osob a kvalita dat se liší podle použitého senzoru a výkonu použité platformy. V případě senzoru Kinect jsou možnosti softwaru podobné oficiálnímu SDK s výhodou podpory jiných platforem, než je systém Windows.

Bezplatná verze je omezená dobou použití na 3 minuty, placené verze jsou neomezené časem a mají povolené komerční využití. Cena za licenci je 29.99 \$ za roční předplatné, případně 59.99\$ za časově neomezenou licenci [11].

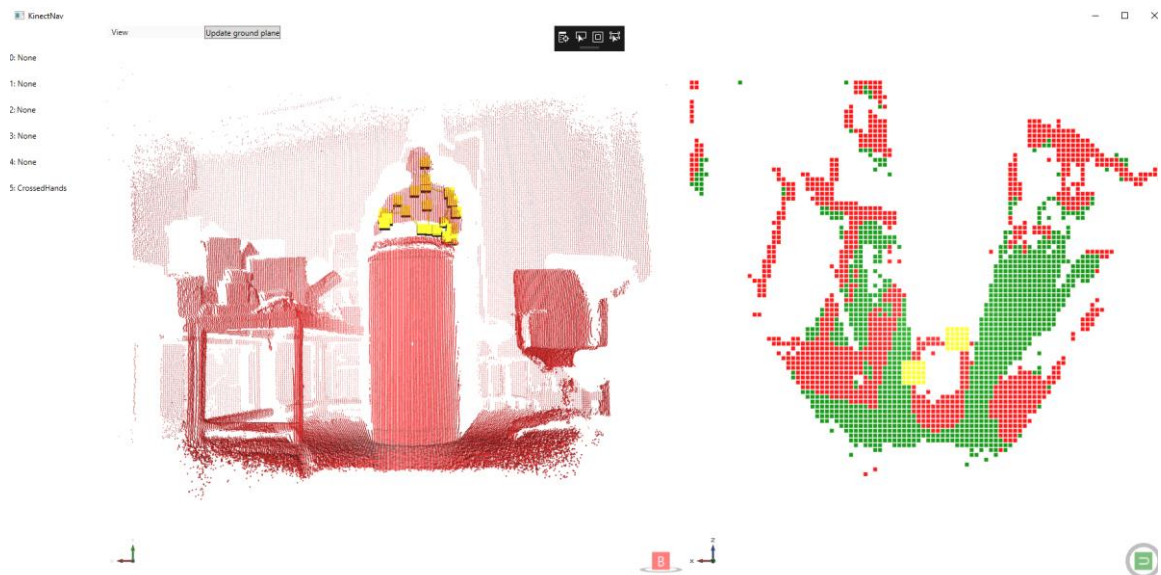
5. Aplikace pro ovládání robota

Aplikace zpracovává a zobrazuje data ze senzoru Kinect v2, který je umístěn na mobilním robotu. Aplikace demonstruje využití senzoru pro navigaci robota, mezi funkce patří detekce překážek, rozpoznávání člověka a rozpoznávání gest pro ovládání robota. Aplikace je vytvořena v jazyce C# ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio a pro komunikaci se senzorem a zpracování dat používá Kinect for Windows SDK 2.0.

Zdrojový kód aplikace je přiložen na CD.

5.1. Uživatelské rozhraní

Rozhraní aplikace je zobrazeno na obrázku 16.



Obrázek 14: Rozhraní aplikace

Okno aplikace je rozděleno do tří částí: V levé části jsou zobrazeny rozpoznané postavy, u každé postavy je zobrazen stav sledování a zda je rozpoznáno gesto. V levé střední části se nachází náhled umožňující vizualizaci bodů v prostoru, v pravé části se nachází 2D mapa povrchu v zorném poli robota.

5.2.Data poskytovaná senzorem

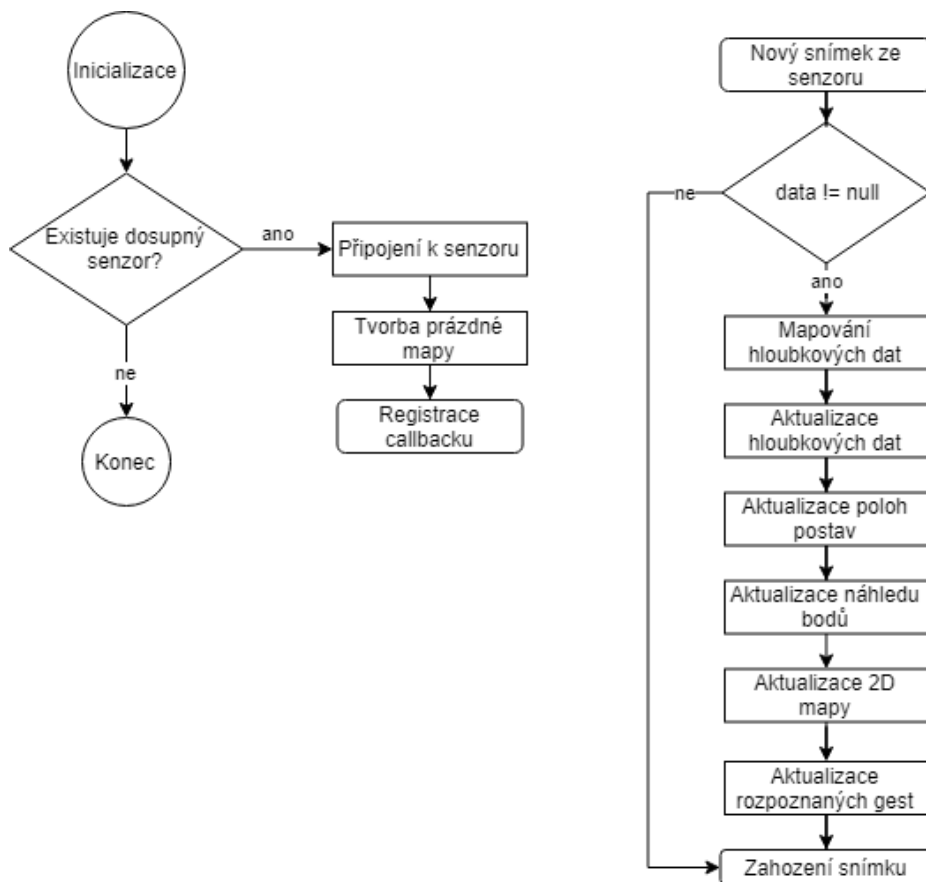
SDK poskytuje přístup k následujícím datům ze senzoru:

- Audio – surová data, určení směru zdroje zvuku
- Color stream – obraz z RGB kamery
- Infrared Stream – obraz z infračervené kamery
- Depth Stream – data z hloubkového senzoru
- Body Stream – data obsahující rozpoznané postavy, včetně poloh identifikovaných kloubů rekonstruované kostry

Pro účely ovládání a navigace robota jsou v aplikaci použity Depth Stream a Body Stream.

5.3.Struktura aplikace

Aplikace je vytvořena v jazyce C#, pro grafické rozhraní je použita knihovna tříd Windows Presentation Foundation (WPF). Struktura aplikace je zobrazena na obrázku 17:



Obrázek 15: Struktura aplikace

5.3.1. Připojení k senzoru

Funkce a vlákno zajišťující obsluhu senzoru jsou definovány ve třídě *KinectController*.

Po inicializaci aplikace dojde k připojení k senzoru a vytvoření nového vlákna, které přijímá data ze senzoru a zpracovává je. Oddělení vlákna zpracovávajícího data od vlákna uživatelského prostředí je důležité, jelikož některé operace zpracovávání dat (například detekce podlahy) mohou trvat delší dobu, po kterou by uživatelské prostředí nereagovalo. Po vytvoření vlákna je zaregistrován callback *Reader_MultiSourceFrameArrived*, který je zavolán vždy po aktualizaci dat ze senzoru. Senzor generuje data s frekvencí 30 Hz.

Po obdržení dat ze senzoru proběhne kontrola, zda nejsou data prázdná, následně jsou volány jednotlivé funkce zpracovávající data.

5.3.2. Zpracování hloubkových dat

Po přijetí nových dat ze senzoru je třeba zpracovat surový hloubkový snímek. Každý hloubkový snímek obsahuje pixely obsahující vzdálenost (mm) od senzoru k nejbližšímu objektu. Maximální vzdálenost detekce je 8 metrů, kvalita dat ale začíná klesat už po 4,5m. Body ve vzdálenosti větší než 4,5m jsou aplikací ignorovány.

Souřadnicový systém

Pro práci s hloubkovými body je třeba definovat souřadnicový systém. V SDK je jako hlavní prostor označen *Camera Space*, který je definován takto: počátek je umístěn ve středu IR senzoru, X,Y,Z je pravotočivý systém podle obrázku 18 a vzdálenosti jsou udávány v metrech.



Obrázek 16: Souřadnicový systém senzoru [10]

Všechny funkce zpracovávající data ze senzoru pracují v tomto prostoru. Protože jednotlivé senzory (kamera, hloubkový senzor, IR senzor) jsou vůči sobě posunuté, SDK obsahuje funkce *CoordinateMapper* pro přemapování dat do hlavního systému.

Hloubková data

Po zpracování surového hloubkového snímku jsou data ve formátu mračna bodů, tedy neuspořádaná sada 3D bodů se souřadnicemi X,Y,Z. Souřadnice odpovídají zavedenému souřadnému systému, jednotka je metr. Rozlišení senzoru je 512 x 424, 3D bodů tedy může být až 217 088.

Všechny body detekované senzorem jsou uloženy ve slovníku *allPoints*, kde má každý bod unikátní index. Všechna další mračna bodů (například překážky) jsou z důvodu velkého množství bodů uložena pouze jako seznam indexů z hlavního slovníku. Toto řešení snižuje paměťovou náročnost, slovník umožňuje rychlé hledání bodu podle klíče s náročností blízké $O(1)$.

Hloubková data jsou uložena ve třídě *DepthData*, která obsahuje slovník všech hloubkových bodů *allPoints* a seznamy indexů všech bodů *AllPointsIndexes*, indexů bodů překážek *ObstPointsIndexes* a indexů bodů země *GroundPointsIndexes*.

Detekce překážek

Pro navigaci robota jsou použita surová data z hloubkového senzoru. Z těchto dat je třeba odfiltrovat data, která nejsou překážkou pro pohyb robota. Jde zejména o body podlahy, po které se robot pohybuje a body, které jsou dostatečně vysoko a pod kterými může robot bez problému projet. Pro detekci podlahy je použitý algoritmus RANSAC.

Random sample and consensus (RANSAC) je metoda často využívaná v počítačovém vidění. Jedná se o iterativní metodu pro výpočet parametrů matematického modelu ze zkoumaných dat. RANSAC je nedeterministický algoritmus, jelikož poskytuje žádaný výsledek jen s určitou pravděpodobností, která se zvyšuje počtem iterací.

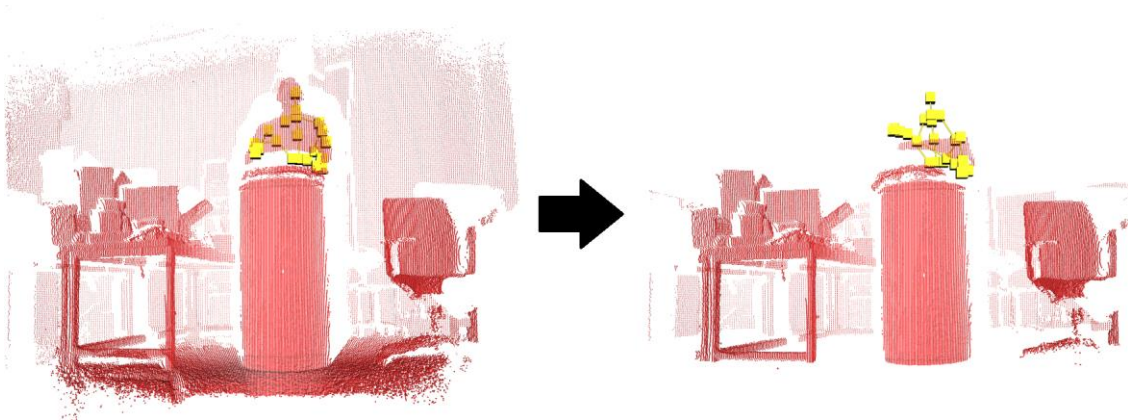
Základním předpokladem je, že vstupní data obsahují body, které popisují námi hledaný model a body, které do tohoto modelu nepatří. Nejprve dojde k výběru minimálního počtu bodů odpovídajících hledanému modelu, následně je tento výběr ohodnocen podle toho, jak model sestavený z vybraných bodů odpovídá hledanému modelu. Algoritmus se opakuje předem daným počtem iterací, kdy vždy náhodně vybere body a průběžně zaznamenává nejlépe hodnocený model.

V programu je RANSAC algoritmus použitý na všechny hloubkové body s parametrem hledaného modelu plochy. Výsledná nalezená plocha odpovídá největší ploše v mračnu bodů. Největší plocha nemusí vždy odpovídat podlaze, proto je třeba zkontrolovat její

orientaci v prostoru. Pokud je tato plocha orientovaná ve směru předpokládané podlahy (XZ), je tato plocha označena za podlahu. Pokud je plocha orientována jinak (například svislá zeď), ze seznamu původně všech bodů jsou odstraněny body odpovídající poslední ploše a algoritmus je opakován.

Po úspěšné detekci jsou ze všech hloubkových dat vyfiltrovány body patřící do blízkého okolí nalezené plochy a ty jsou označeny za body podlahy. Za body překážek jsou označeny body mezi nalezenou plochou a výškou robota.

Z důvodu výkonu je detekce podlahy prováděna pouze jednou po spuštění programu a poté jen na vyžádání uživatele. Opětná detekce není za normálních okolností nutná, data je nutno obnovit pouze při změně orientace senzoru vůči podlaze.



Obrázek 17: Filtrování bodů překážek

5.3.3. Vizualizace postav

Body kostry postav jsou uloženy ve třídě *BodyData*. Kinect umožňuje sledování až 6 postav zároveň, případně 2 postav s detailním sledováním rukou.

Data popisující rozpoznané postavy jsou obsažena ve snímku *Body Stream*, konkrétně v proměnné *bodies*. Každá rozpoznaná postava obsahuje informace o poloze 25 kloubů kostry, včetně míry jistoty detekce daného bodu. Pokud jsou v záběru senzoru pouze dvě postavy, SDK podporuje detekci stavu ruky: otevřená, uzavřená a „lasso“ (dva prsty).

Kostra postavy je v aplikaci kreslena do náhledu hloubkových bodů žlutě, v případě detekce stavu ruky jsou jednotlivé stavy odlišeny barevně. V 2D mapě jsou políčka s polohou nohou označena žlutě.

5.3.4. 2D mapa povrchu

Pro názorné zobrazení detekovaných objektů v zorném poli robota a pro účely navigace generuje aplikace 2D mapu zorného pole senzoru. Mapa má velikost 100 x 100 políček, velikost mapy je 4,5 x 4,5m.

Barvu políčka určuje jeho obsah: Zelená – podlaha, červená – překážka, žlutá – člověk. Pokud políčko mapy nemá barvu, znamená to, že senzor do tohoto místa nevidí.



Obrázek 18: Mapa s postavou

5.3.5. Rozpoznávání gest

Rozpoznávání gest řídí třída *GestureDetector*. Každá detekovaná postava má ke svému ID přiřazenou instanci této třídy. Třída používá funkce SDK pro rozpoznávání gest z předem připravené databáze. Pokud je gesto rozpoznáno, zobrazí se v seznamu v levém sloupci aplikace.

5.3.6. Vizualizace bodů

Funkce pro vizualizace bodů a kreslení mapy jsou obsaženy ve třídě *DrawController*.

Aplikace umožňuje zobrazení hloubkových bodů v reálném čase. V okně náhledu je možné zobrazit všechny hloubkové body, body považované za překážku, body považované za podlahu a body kostry rozpoznávaných postav. V náhledu jsou hloubkové body zobrazeny červeně a body kostry žlutě.

Náhled všech hloubkových bodů vyžaduje zobrazení přes 200 000 objektů ve 3D prostoru, je tedy poměrně náročný na zpracování. Dostupné nástroje v prostředí UWP pro

kreslení do 3D prostoru jsou pro tento účel příliš pomalé, proto je pro zobrazení objektů použita knihovna Helix Toolkit, která umožňuje vykreslování objektů s akcelerací DirectX 11.

Náhled běží ve vláknu uživatelského rozhraní, které je oddělené od zpracování dat. V náhledu lze manipulovat s kamerou a je v něm zobrazen souřadnicový systém.

5.4. Použití senzoru k navigaci

Navržená aplikace dokazuje, že senzor Kinect je možné použít k navigaci mobilního robota. S pomocí dat získaných ze senzoru je možné vytvořit mapu prostoru před robotem, detekovat v něm překážku a zvolit vhodnou cestu.

Vzhledem k tomu, že senzor není pro tento účel primárně navržen, má svá omezení. I přes tato omezení je ale senzor zajímavou alternativou pro mapování prostoru na krátké vzdálenosti.

Hloubková data

Senzor je možné použít pro přesné mapování okolí robota. Rozlišení hloubkového senzoru je dostatečné pro detekci i malých překážek. Omezením je maximální vzdálenost přesného měření 4,5 m a také použitá technologie TOF. Problémy působí zejména odrazivé plochy, od kterých se může měřící paprsek odrazit a způsobit tak chybné měření.

Na obrázku 21 lze pozorovat chybné měření, kde kvůli odrazu paprsku od podlahy nejsou body pozorované pod ostrým úhlem vůbec detekovány a některé body stěny jsou detekovány pod podlahou.



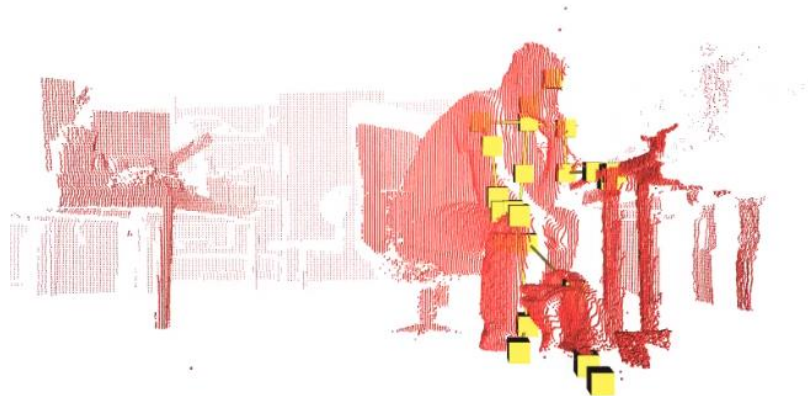
Obrázek 19: Chybné měření vzdálenosti

Detekce za pohybu senzoru

Senzor Kinect je původně určený pro stacionární použití s herní konzolí, algoritmus pro detekci postav a gest nebyl navržen pro pohyb senzoru. Při experimentech s pohybem fungovala detekce bez problému pouze při vodorovném pohybu senzoru a při nízkých vibracích. Změna naklopení senzoru v kterékoliv ose a také posun ve vertikální ose způsobují přerušování sledování. Při pohybu senzoru nejsou ovlivněna surová hloubková data, které lze bez problému použít k detekci překážek.

Detekce postav

Senzoru trvá delší dobu první detekce člověka. Po první detekci funguje sledování i při částečném zakrytí postavy překážkou, senzor má ale v některých případech problém odlišit člověka od objektu. Pokud má objekt podobný objem jako lidská postava a sledovaný člověk se k takovému objektu přiblíží, může nastat záměna objektu a postavy. Na obrázku 22 jsou zobrazeny chybně detekované klouby sedící postavy.



Obrázek 20: Chybná detekce postavy

Spotřeba senzoru a zpracování dat

Spotřeba senzoru je při snímání zhruba 15W. Data ze senzoru je nutné zpracovávat na počítači. Počítač musí být umístěný přímo na robotovi, jelikož senzor vyžaduje přímé připojení přes rozhraní USB 3.0. Vzhledem k objemu zpracovávaných dat je nutný výkonný počítač, minimální specifikace jsou: dvoujádrový 64-bitový procesor 3,2GHz nebo rychlejší, 2GB RAM, USB 3.0. Použité SDK podporuje pouze Windows 8 a Windows 10.

6. Závěr

V úvodní části práce byla vypracována rešerše hloubkových snímačů a jejich praktického využití. Navzdory ukončenému prodeji a podpoře byl pro další řešení využit senzor Kinect v souladu se zadáním práce.

Pro ověření použitelnosti senzoru byl vytvořen program umožňující zobrazení hloubkových dat, detekovaných postav a gest. Program dále hloubková data zpracovává, detekuje v nich překážky a vytváří 2D mapu prostředí před senzorem.

Senzor se ukázal jako vhodný pro snímání povrchu v blízkosti robota, pro přesnou detekci blízkých překážek a mapování okolí. Pro navigaci jsou také užitečná data o rozpoznaných postavách a detekce gest může být vhodným rozhraním pro základní ovládání robota. Při využití dat o postavách a gestech je ale nutné dbát na omezení senzoru.

Omezení senzoru vycházejí především z jeho původního účelu pro ovládání her. Mezi omezení patří: maximální vzdálenost snímání 4,5 m, vysoká spotřeba, nutnost výkonného počítače pro zpracování dat, problém detekce postav a gest při pohybu senzoru a problém s detekcí hloubky na některých površích. Naopak výhody senzoru jsou nízká cena v porovnání s jinými metodami snímání hloubky a SDK poskytované zdarma obsahuje pokročilé funkce, zejména funkce sledování celého těla člověka, které aktuálně nenabízí žádný jiný senzor.

Použitá literatura

- [1] Xbox One Kinect Teardown [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z:
<https://www.ifixit.com/Teardown/Xbox+One+Kinect+Teardown/19725>
- [2] Kinect With Me Part 1 – Setting Up Your Machine [online]. [cit. 2018-02-18]. Dostupné z:
<https://blogs.msdn.microsoft.com/cdn devs/2014/10/23/kinect-with-me-part-1-setting-up-your-machine/>
- [3] SELL, John a Patrick O'CONNOR. The Xbox One System on a Chip and Kinect Sensor. IEEE Micro [online]. 2014, 34(2), 44-53 [cit. 2018-02-21]. DOI: 10.1109/MM.2014.9. ISSN 0272-1732. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6756701/>
- [4] 3D scanning with Windows 10 [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z:
<https://developer.microsoft.com/en-us/windows/hardware/3d-print/scanning-with-kinect>
- [5] Kinect pro Windows [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: Kinect pro Windows.
<https://developer.microsoft.com/cs-cz/windows/kinect> [online]. [cit. 2018-04-07].
- [6] Basler 3D Cameras [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z:
<https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/3d-cameras/>
- [7] Visionary-T [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://www.sick.com/cz/cs/kamerove-systemy/3d-vision/visionary-t/c/g358152>
- [8] Intel RealSense stereo [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z:
<https://realsense.intel.com/stereo/>
- [9] Intel RealSense coded light [online]. [cit. 2018-04-11]. Dostupné z:
<https://realsense.intel.com/coded-light/>
- [10] Kinect for Windows SDK 2.0 [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z:
<https://docs.microsoft.com/en-us/previous-versions/windows/kinect/>
- [11] NUI TRACK SDK [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://nuitrack.com/>
- [12] Infsoft: INDOOR POSITIONING & NAVIGATION [online]. 2016 [cit. 2018-05-05].
Dostupné z: <https://www.infsoft.com/portals/0/images/solutions/basics/whitepaper/en-indoor-navigation-indoor-positioning-infsoft-ebook.pdf>

- [13] SKALKKA, Marek. 2011. Srovnání lokalizačních technik. Praha. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra softwarového inženýrství. Vedoucí práce RNDr. David Obdržálek.
- [14] SICK USA blog [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://sickusablog.com/resolve-safety-laser-scanner-issues-diagnostic-logs/>
- [15] SHOTTON, Jamie, Andrew FITZGIBBON, Mat COOK, Toby SHARP, Mark FINOCCHIO, Richard MOORE, Alex KIPMAN a Andrew BLAKE. Real-time human pose recognition in parts from single depth images. In: CVPR 2011 [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 1297-1304 [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.1109/CVPR.2011.5995316. ISBN 978-1-4577-0394-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5995316/>
- [16] BlasterX Senz3D [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://us.creative.com/p/web-cameras/blasterx-senz3d>
- [17] XYZprinting 3D scanner [online]. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: http://eu.xyzprinting.com/eu_en/Product/3D-Scanner
- [18] Leap Motion's 'Interaction Engine' Aims for Effortless VR Input [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.roadtovr.com/leap-motion-interaction-engine-virtual-reality-input-ces-2016/>

Seznam příloh

1 x CD

Elektronická verze práce

Zdrojový kód aplikace

Instalační soubor vytvořené aplikace