

Systém senzoricky vybavené helikoptéry s mechanismem pro bezpečný let v úloze autonomní dokumentace interiérů historických budov

Funkční vzorek projektu DG18P02OVV069

Vít Krátký, Pavel Petráček, Pavel Stoudek, Martin Saska

Afiliace autorů: České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta Elektrotechnická, Katedra kybernetiky

8. listopadu 2021



Dokumentace výsledku projektu "Bezpečné snímání historických objektů bezpilotními helikoptéry - asistivní technologie, metodika a využití v památkové praxi" (DG18P02OVV069) ve formě funkčního vzorku.

Číslo technické dokumentace: 20211108

Interní identifikace: DG18P02OVV069-FVZ1

Anotace: Bepilotní helikoptéra vybavená palubními senzory a výpočetní kapacitou umožňující autonomní let v lidmi nepřístupných interiérech historických budov. Výsledek umožňuje realizovat dokumentační techniky používané pracovníky památkářské péče v obtížně dostupných místech a v blízké vzdálenosti od skenovaných objektů. Navržený systém je založen na osm rotorové helikoptéře s koaxiálním uspořádáním motorů. Rám helikoptéry je sestaven z hliníkových profilů spojených prvky z uhlíkových vláken. V centrální části je umístěna distribuční deska zajišťující základní funkce spojené s distribucí elektrické energie a rozhraní pro propojení řídicích a senzorických prvků. Nad distribuční deskou je umístěna řídicí jednotka Pixhawk zajišťující převod řídicích signálů na akční zásahy jednotlivých rotorů. Na centrálním prvku je dále umístěn palubní počítač Intel NUCi7, hlavní výpočetní jednotka helikoptéry. Dále je helikoptéra vybavena 3D laserovým skenerem Ouster OS0-128, hloubkovou kamerou Intel Realsense D435, laserovými dálkoměry Garmin Lidar Lite v3 a inerciální měřicí jednotkou obsaženou v řídicí jednotce. Pro řízení navrženého systému je využit MRS UAV systém pro řízení bezpilotních helikoptér. Nad rámec tohoto softwaru je navržená helikoptéra vybavena softwarem pro odpuzování od překážek v rámci autonomního i semi-autonomního letu.

Abstract: A micro aerial vehicle equipped with on-board sensors and computing power enabling autonomous flight in hardly accessible interiors of historical buildings. The result enables to implement documentation techniques used by experts in the field of restoration and historical science in hard-to-reach places in proximity to scanned objects. The proposed system is based on an eight-rotor

helicopter with a coaxial arrangement of rotors. The frame of the helicopter is composed of aluminium profiles connected by carbon-fibre elements. The helicopter is equipped with a distribution board providing basic functions associated with the distribution of electrical energy and an interface for connecting control and sensor elements. Above the distribution board, there is a Pixhawk control unit ensuring the conversion of control signals into control inputs of individual rotors. The helicopter's main computing unit is the Intel NUCi7 on-board computer, which is also located on the central element. The helicopter is also equipped with a 3D laser scanner Ouster OS0-128, an Intel Realsense D435 depth camera, Garmin Lidar Lite v3 laser rangefinders and an inertial measuring unit included in the Pixhawk control unit. The MRS UAV system for the control of unmanned helicopters is used for autonomous control of the proposed system. In addition to this software, the designed helicopter is equipped with software for repulsing from obstacles in both autonomous and semi-autonomous flights.

Specifikace výsledku

Technické specifikace platformy bezpilotní helikoptéry vybavené palubními senzory a výpočetní kapacitou umožňující autonomní let v lidmi nepřístupných interiérech historických budov. Výsledek umožňuje realizovat dokumentační techniky používané pracovníky památkářské péče v obtížně dostupných místech a v blízké vzdálenosti od skenovaných objektů.

Dokumentace a popis výsledku

Návrh a dokumentace hardwaru

V rámci návrhu byl kladen důraz na vytvoření funkčního vzorku, který by vedle požadovaných vlastností zvyšujících bezpečnost nasazení bezpilotních prostředků v historických budovách vykazoval i výraznou úroveň modularity z hlediska snímacího zařízení a jeho orientace na helikoptěře. Navržená helikoptéra¹ je tak schopna nést různé typy senzorického vybavení využívaného pro dokumentaci historických objektů až do váhy jednoho kilogramu. Senzorické vybavení může být umístěno na rámu helikoptéry ve dvou různých konfiguracích — na stabilizačním zařízení s nastavitelnou orientací v okolí dopředné orientace a na pasivně-tlumeném uložení s orientací směrem vzhůru. V rámci procesu návrhu funkčního vzorku byla nejprve postavena první verze systému, která byla úspěšně nasazena i v historických památkách. Následně byl zpracován druhý návrh funkčního vzorku integrující požadavky na úpravy vycházející z testování první verze systému. Na základě tohoto návrhu byla zhotovena finální verze funkčního vzorku prezentovaná v tomto dokumentu.

Kompletní návrh hardwaru byl proveden formou počítačově asistovaného návrhu (viz Obrázek 1). Strukturální (nesenzorické a neelektrické) části navrženého modelu byly následně přímo použity pro strojovou výrobu strukturálních částí helikoptéry. Navržený systém je založen na osmirotorové helikoptěře s koaxiálním uspořádáním motorů splňujícím požadavek na vysokou nosnost se současným zachováním relativně malých rozměrů helikoptéry a zároveň zajišťujícím motorickou redundanci. Rám helikoptéry je sestaven z hliníkových profilů spojených prvky vyfrézovanými z desek z laminovaných uhlíkových vláken. Jednotlivé rotory jsou osazeny třinácti palcovými uhlíkovými vrtulemi, které jsou zvenčí chráněny kryty z uhlíkových desek. Kryt vrtulí slouží jako poslední bezpečnostní prvek při selhání všech ostatních protikolizních prvků, kterými je helikoptéra vybavena. V případě kolize s okolním prostředím zabraňuje kryt kontaktu vrtulí s okolním prostředím, čímž je zabráněno výraznějšímu poškození okolních objektů rotujícími vrtulemi a zároveň destrukci vrtulí, která by učinila helikoptéru neletuschopnou. Zdrojem elektrické energie helikoptéry jsou dvě 6 článkové Lithium-polymerové baterie.

¹Pozn.: taktéž multikoptéra, hexakoptéra, bezpilotní prostředek, dron, a další.

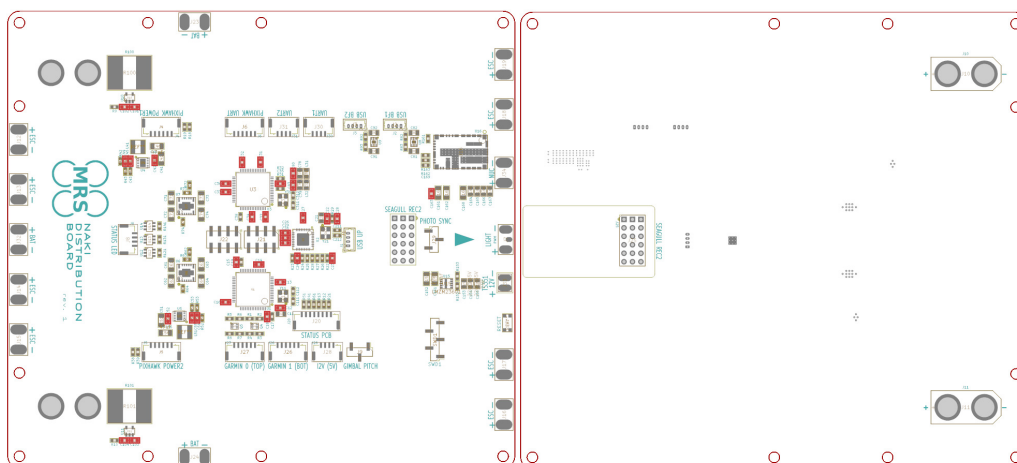
Hlavní senzory a řídicí prvky helikoptéry jsou umístěny v centrální části helikoptéry na soustavě uhlíkových desek. Uprostřed centrálního prvku je umístěna distribuční deska (viz Obrázek 2), speciálně navržena pro předkládaný funkční vzorek. Tato deska zajišťuje základní funkce spojené s distribucí elektrické energie: připojení motorů ke zdroji elektrické energie, rozhraní pro propojení řídicí jednotky, senzorů a palubního počítače, rozhraní pro propojení řídicího modulu palubní kamery s počítačem a generování diagnostických signálů. Nad distribuční deskou je umístěna řídicí jednotka Pixhawk 2.1 zajišťující převod řídicích signálů na akční zásahy jednotlivých rotorů. Na centrálním prvku je dále umístěn palubní počítač Intel NUCi7, který je hlavní výpočetní jednotkou helikoptéry. Během mise palubní počítač zpracovává všechna data ze senzorů, spouští všechny programy potřebné pro autonomní let a vykonávání požadované mise a současně zprostředkovává operátorovi rozhraní pro provádění zásahů do systému v průběhu vykonávání mise (např., umožňuje ovládat palubní kameru sloužící pro sběr dat, přerušit či pozastavit misi apod.). Ze senzorického pohledu je helikoptéra vybavena 3D laserovým skenerem Ouster OS0-128, hloubkovou kamerou Intel Realsense D435, laserovými dálkoměry Garmin Lidar Lite v3 a inerciální měřicí jednotkou s trojitou redundancí a termální stabilizací obsaženou v řídicí jednotce Pixhawk 2.1.



Obrázek 1: CAD model navrženého funkčního vzorku.

Řídicí software

Pro řízení navrženého systému je využit MRS UAV systém pro řízení bezpilotních helikoptér (https://github.com/ctu-mrs/mrs_uav_system), který byl intenzivně otestován v pro let nepříznivých podmínkách zahrnujících prašné prostředí, prostředí s různou úrovní osvětlení i let v prostředí malých rozměrů a tedy s výrazným vlivem vzdušných proudů generovaných samotnou helikoptérou. Nad rámec standardního řídicího softwaru je navržena bezpilotní helikoptéra vybavena senzory a softwarem pro odpuzování od překážek v rámci autonomního i semi-autonomního letu a dále diagnostickými prvky využívanými pro zprostředkování informace o stavu systému operátorovi a bezpečnostnímu pilotovi.



Obrázek 2: PCB návrh distribuční desky.

Asistivní technologie pro pořízování fotografií

Jelikož většina intenzivně používaných dokumentačních technik vyžaduje fotografování ve viditelném spektru, nejčastěji využívaným dokumentačním zařízením je kamera Sony Alpha A6500. Pro tento typ vybavení navržený systém poskytuje nejvyšší podporu z hlediska asistivních technologií pro operátora. Systém je vybaven řídicím systémem Seagull #REC2, který umožňuje ovládat kameru prostřednictvím signálů zasílaných z palubního počítače. Spoušť kamery tak může být ovládána programem zajišťujícím vykonání mise nebo může být ovládána uživatelem prostřednictvím spojení s palubním počítačem. Druhou částí asistivní technologie pro pořízování fotografií je přenos obrazu přímo z kamery používané pro pořízování fotografií na FPV displej operátora. Tato technologie umožňuje především velmi přesné zacílení na konkrétní prvek v semi autonomním či manuálním režimu letu.

Testování systému

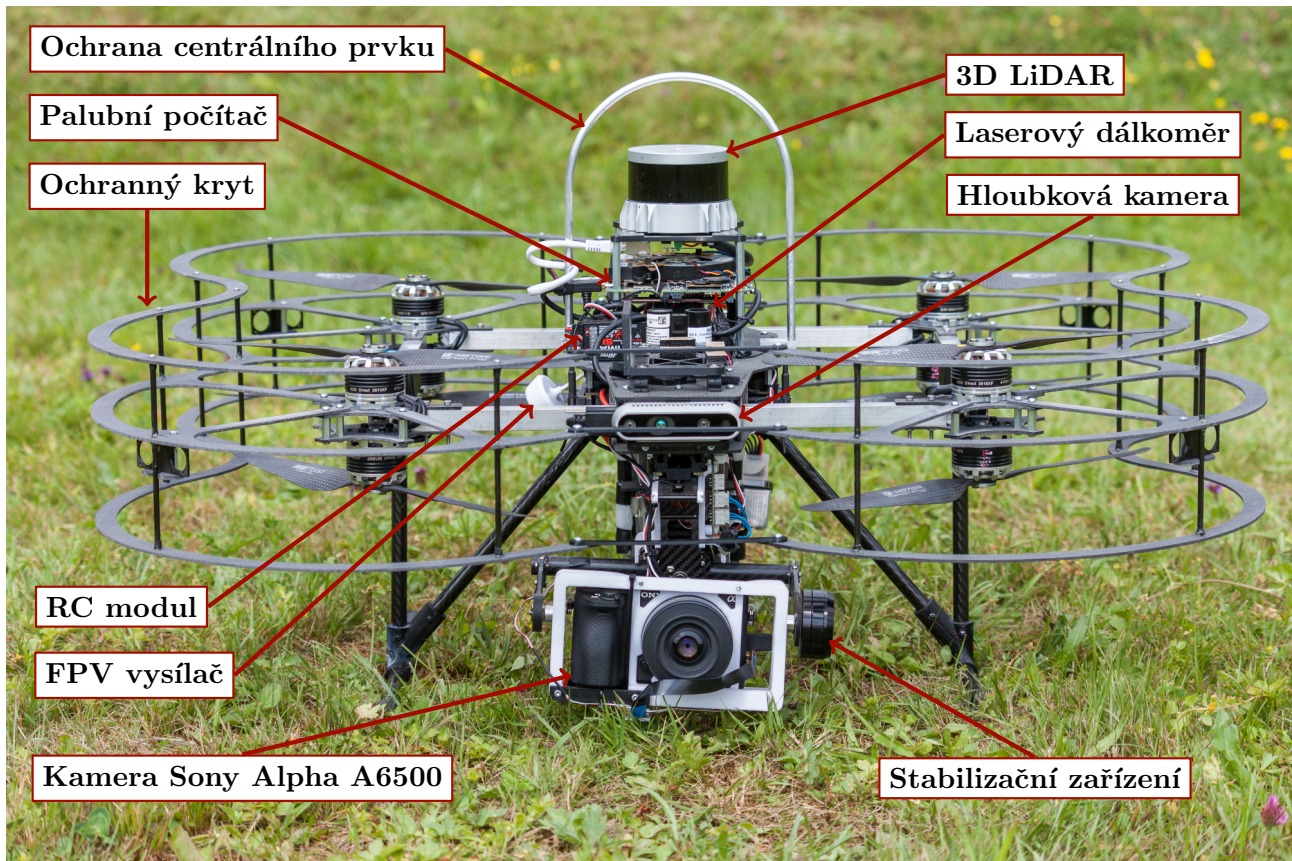
Softwarová část systému byla intenzivně testována v rámci realistického robotického simulátoru skupiny MRS <https://github.com/ctu-mrs/simulation>. Celý systém byl následně testován v simulovaných reálných scénářích v průmyslových budovách. Po tomto testování byla první i finální verze navrženého systému nasazena v historických budovách. Konkrétně v objektech:

- Kostel sv. Mořice v Olomouci
- Poutní kostel sv. Jakuba Většího a sv. Anny ve Staré Vodě u Libavé
- Kostel Panny Marie Sněžné v Olomouci
- Kostel sv. Máří Magdalény v Chlumíně
- Sál předků ve Státním zámku Vranov nad Dyjí
- Rondel na Státním hradu a zámku Jindřichův Hradec
- Pohřební kaple všech svatých na zámku v Telči
- Sněmovní sál Arcibiskupského zámku v Kroměříži
- Mauzoleum rodu Kleinů v Sobotíně
- Kostel povýšení sv. Kříže v Prostějově
- Kostel Nanebevzetí Panny Marie v Cholině

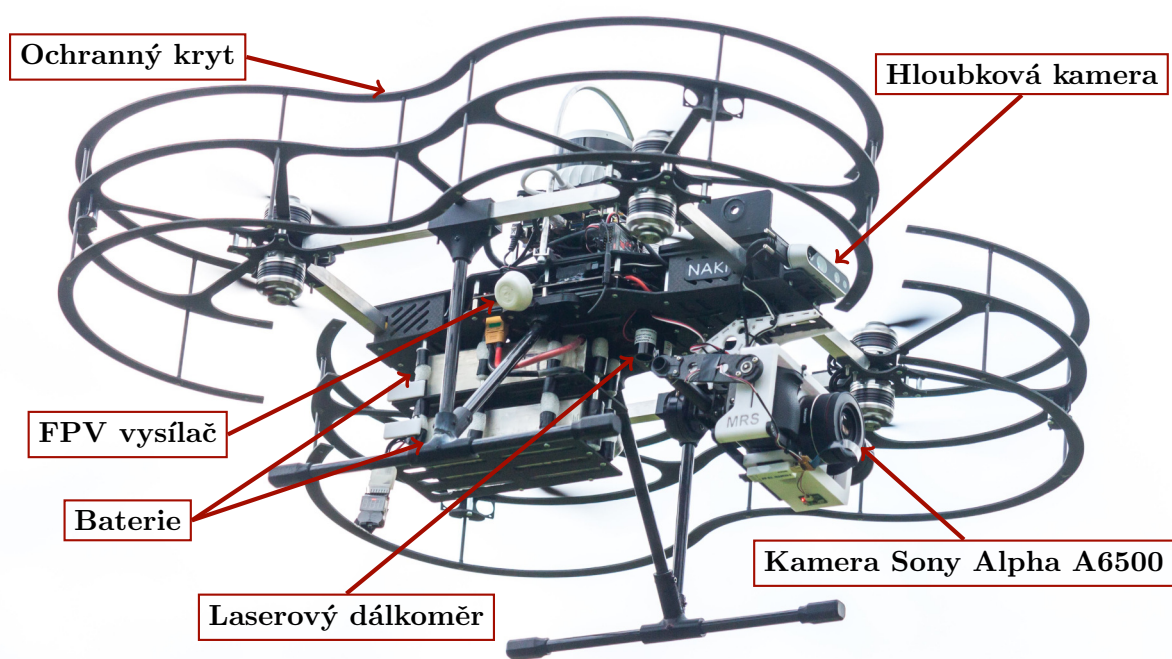
Videa a fotografie z reálného nasazení jsou uveřejněny na stránkách projektu.

Prezentace výsledného funkčního vzorku

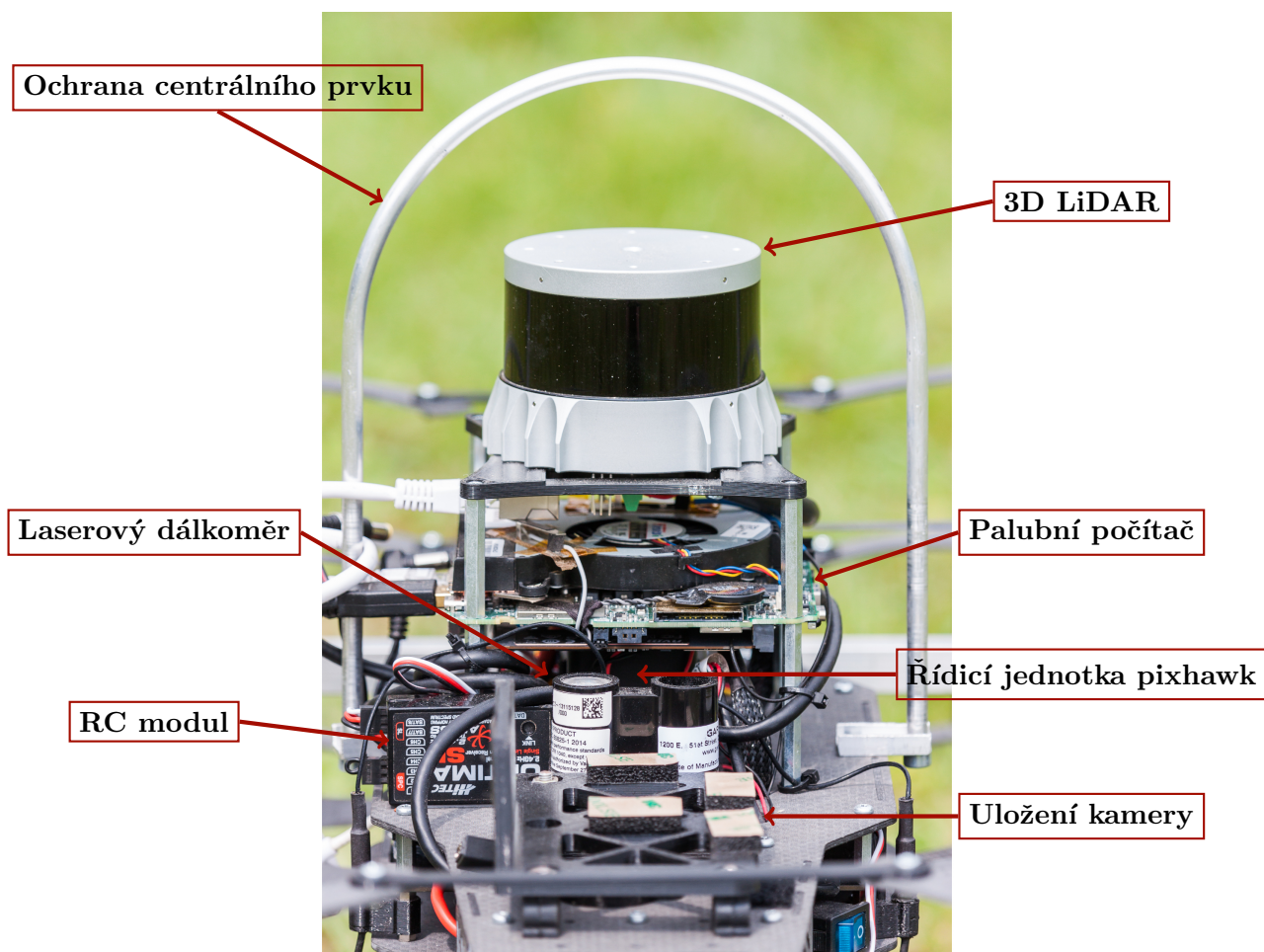
Pro prezentaci dosažení výsledku byla provedena rozsáhlá videodokumentace nasazení funkčního vzorku ve výše zmíněných objektech. Tato videodokumentace je dostupná na stránkách projektu (<https://youtu.be/T-t60x-Xd0E> a <https://www.dronument.cz/galerie>) a je podpořena fotodokumentací prezentovanou níže v tomto dokumentu a rovněž na stránkách projektu. 3D model navrženého funkčního vzorku je přístupný prostřednictvím odkazu <https://a360.co/3FYtWpp>. Návrhy použitých PCB desek jsou dostupné přes odkaz <https://nasmrs.felk.cvut.cz/index.php/s/sWBgIMNOSd4rK3p>.



Obrázek 3: Navržený funkční vzorek s popisem jednotlivých prvků — přední pohled.



Obrázek 4: Navržený funkční vzorek s popisem jednotlivých prvků — boční pohled.



Obrázek 5: Detail centrálního prvku navrženého funkčního vzorku s popisem jednotlivých prvků.



Obrázek 6: Diagnostická deska poskytující informace o funkci základní desky a napájení řídicích jednotek helikoptéry.



Obrázek 7: Navržený funkční vzorek sensoricky vybavené helikoptéry s mechanismem pro bezpečný let.



Obrázek 8: Navržený systém během nasazení v Kostele sv. Jakuba Většího a sv. Anny ve Staré Vodě u Libavé.



Obrázek 9: Navržený systém během nasazení v Kostele sv. Mořice v Olomouci.



Obrázek 10: Navržený systém během nasazení ve špatných světelných podmínkách společně s druhou autonomní helikoptérou zajišťující osvětlení.