

TAČR TREND

Název projektu:

Flexibilní robotické pracoviště pro malosériovou výrobu
(FW03010501)

Technická zpráva

[O] Koncepce operátorské navádění robotu za účelem intuitivního programování

Martin Švejda (ZČU), Arnold Jáger (ZČU), Jan Reitingер (ZČU)

datum: 17. 10. 2021



Identifikátor účastníka projektu:

IMI: Integrated Micro-Electronics Czech Republic s.r.o.

ZČU: Západočeská univerzita v Plzni

Obsah

Popis z přihlášky projektu	2
Úvod	3
Koncepční návrh operátorského navádění - ustavení robotu/komponenty	3
Koncepční návrh operátorského navádění - intuitivní přeprogramování pohybu	5
Ruční navádění robotu	7
Mechanické umístění 3D myši na robot	8
Propojení 3D myši s řídicím systémem robotu	9
Reference	11

Popis z přihlášky projektu

ZČU: Koncepce technických možností programování robotů intuitivní. Analýza dvou konceptů řešení:

- a) Navádění za rukou (kontaktní systém tažení efektoru a/nebo ramen robotu)
- b) Trekovací systém (bezkontaktní systém snímání pohybu operátora)

IMI: Průzkum akceptovatelných metod programování robotů operátory výroby

Úvod

Předložená zpráva shrnuje základní požadavky na koncepci systému pro intuitivní operátorské ovládání robotu v aplikacích manipulace s osazenými deskami plošných spojů (PCBA). Prioritním cílem je možnost obsluhovat roboty nasazené ve výrobě běžnými operátory (ne specialisty, ne integrátory) a během dynamicky se měnící části aplikace/provozu umožnit její efektivní přestavbu a znovuzprovoznění. Dynamickou částí průmyslové aplikace rozumíme tu část, která se v čase neustále obměňuje, např. v důsledku přesunutí dílčích funkčních celků technologie (v uvažované aplikaci např. funkční testery PCB, atd.) či samotného robotu. Zájmové oblasti, které připadají v úvahu byly v současnosti vyspecifikovány následovně:

1. Možnost snadného ustavení robotického systému v dynamické části (oblasti) průmyslové aplikace. Ustavením robotického systému se rozumí proces referencování polohy robotu vzhledem k pracovišti, typicky např. pokud je robot přesouván mezi více stanovišti.
2. Možnost snadného ustavení komponenty/zařízení v dynamické části aplikace, kdy se nemění jejich formát, ale jen umístění, typicky např. změna polohy funkčního testeru.
3. Možnost snadného přeprogramování zájmových bodů robotu v dynamické části aplikace v případě, že se mění formát uvažovaných komponent, typicky např. změna polohy uchopovacích míst na PCBA, atd.

Motivací k výzkumu a vývoji systému pro intuitivní učení robotů v aplikacích zahrnující robotickou manipulaci především v malosériové výrobě komponent jsou právě operátorská pracoviště hlavního řešitele projektu IMI, viz [1]. V podstatě všechna pracoviště pro osazování diskrétních součástek do desek plošných spojů a následné funkční testování osazených desek jsou v současné době obsluhována ručně.

Koncepční návrh operátorského navádění - ustavení robotu/komponenty

Podstatou návrhu je možnost usazení jednoho používaného robotu k více stanovištím bez nutnosti složité demontáže/montáže robotu z/do předem připravených a striktně lokalizovaných montážních úchyťů (např. konzolí na podlaze, stropu, atd.). Analogický problém nastává v případě mobilních robotů, ať už ve smyslu ručního přesunutí robotu např. po kolečkách (např. pro kolaborativní roboty Baxter, Sawyer, atd.), nebo ve smyslu plně autonomních mobilních robotů.

Dále lze předpokládat, že některé z komponent umístěných na pracovišti může být dislokováno (např. díky výměně/nahrazení, atd.), ale tato změna nemění podstatu úlohy (pohybová trajektorie robotu je formálně shodná, jen v oblasti dislokované komponenty např. posunutá či pootočená).

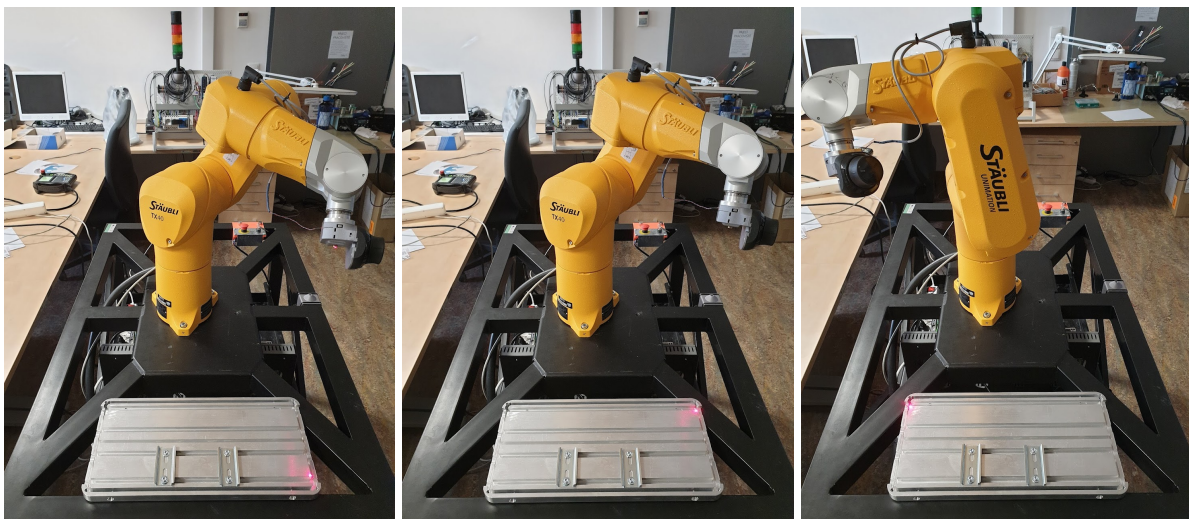
Využití jednoho robotu na více stanovištích či možnost měnit dílčí komponenty na stanovišti za funkčně stejné, jen ne přesně umístěné je zvláště výhodné právě pro malosériové či jinak specifické výroby.

Zamýšlený postup ustavení robotu:

1. Máme k dispozici robot, který má fixní program pro danou aplikaci (zakládání diskrétních součástek, nakládání/vykládání PCB z testeru, atd.).
2. Máme k dispozici více pracovišť, na kterých je stejná aplikace - některé z komponent (např. testery) jsou stejného typu, ale umístěné rozdílně.
3. Robot je přesunut k vybranému stanovišti a je zahájen proces ustavení robotu pomocí zvolené procedury lokalizace umístění robotu, např. zaměření zájmových bodů na pracovišti (rohů pracovní desky, atd.), viz Obrázek 1.
4. Po ustavení robotu je zaměřena dislokovaná komponenta analogickým způsobem - např. zaměřením stanovených zájmových bodů (rohů komponenty, středících kolíků, atd.), viz Obrázek 2.



Obrázek 1: Příklad lokalizace umístění robotu zaměřením rohů pracovní desky laserovým dálkoměrem na koncovém efektoru robotu



Obrázek 2: Příklad lokalizace komponenty (montážní drážkované desky) laserovým dálkoměrem na koncovém efektoru robotu.

Zamýšlená technologie:

Myšlenka lokalizace polohy robotu či dílčích komponent je založena na možnosti snímání polohy vytipovaných zájmových bodů. Laserová technologie snímání je uvažována na základě možnosti bezkontaktního snímání, které je z hlediska ovládání robotu operátorem výroby během procesu zaměření bodu relativně bezpečný, neboť do značné míry eliminuje možnost vzniku kolizních stavů.

Dosavadní experimenty byly realizovány s robotem Staubli TX40 a s laserovým dálkoměrem Panasonic HG-C1200L3-P, viz Obrázek 3.

Z důvodu přesnosti a robustnosti operátorského ustavení robotu a nebo komponenty na pracovišti nebudou uvažovány technologie založené na optickém principu (např. ArUco¹ markery).



Obrázek 3: Laserový dálkoměr Panasonic a robot Staubli TX40

Koncepční návrh operátorského navádění - intuitivní přeprogramování pohybu

Podstatou tohoto návrhu je možnost operativně upravit dílčí pohyby robotu při rekonfiguraci pracoviště, které je schopné po dílčí změně zpracovat několik druhů (sobě blízkých) produktů. Pracoviště by bylo pevně dané ve smyslu umístění robotu a technologií pro automatickou manipulaci a dávkování vstupního materiálu (komponent, či složených PCBA) spolu s automatickým odebíráním obsluženého produktu. Podle potřeby výroby by se měnily ty části pracoviště, dále též cílová technologie, které jsou spojené s konkrétním produktem, např. testery PCBA. Stejným způsobem je uvažovaný koncept pilotní aplikace v technické zprávě [1].

V současnosti jsou vyspecifikovány dva způsoby intuitivního přeprogramování pohybu robotu:

¹ Detekce ArUco markerů: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html

1. Přeučení diskrétních bodů, například přibližovacích bodů k cílové technologii, bodů pro uchopení zpracovávané součásti, nebo dílčích zájmových bodů trajektorie pro přejezd od jedné pozice koncového efektoru ke druhé. V tomto případě se předpokládá přeučování bodů definovaných přímo v programu robotu.
2. Přeučení té části trajektorie, která souvisí s vyměněnou částí pracoviště, například pohyb koncového efektoru při zakládání součásti do testovacího stanoviště. V tomto případě se předpokládá použití přidruženého HW pro zpracování naučeného pohybu a jeho předání do robotu například ve formě strukturovaného textu nebo pole bodů definující naučenou trajektorii. Více viz technická zpráva [2].

Zamýšlený postup přeučení trajektorie:

1. Máme k dispozici robotické stanoviště s pevně danými vstupními a výstupními body zpracovávané komponenty. Program robotu má pevně danou strukturu.
2. V rámci robotického pracoviště se změní cílová technologie potřebná pro aktuálně zpracovávanou komponentu (produkt). Předpokládá se, že tyto cílové technologie jsou si určením blízké a není kvůli její změně zasahovat do struktury programu.
3. Po výměně cílové technologie zaškolený personál provede přeučení bodů trajektorie nebo části trajektorie podle potřeb.

Zamýšlená technologie:

Myšlenka intuitivního přeprogramování pohybu robotu je založena na možnosti přeučit zájmové body trajektorie nebo celé části trajektorie robotu pouze proškoleným personálem bez hlubší znalosti problematiky programování robotů.

Jako nejvhodnější se jeví použití takové technologie, která umožňuje ruční navádění robotu. Tato technologie umožní operátoru výroby intuitivně nastavit polohu robotu nebo provést robotem požadovaný pohyb. Mezi tyto technologie můžeme považovat 3D myš uzpůsobenou pro použití právě pro ruční navádění robotu (viz dále), speciální momentové buňky umístěné na koncovém efektoru robotu, Obrázek 4, nebo speciální roboty, které již svou konstrukcí umožňují ruční navádění, Obrázek 5.



Obrázek 4: Senzor síly Fanuc FS-15iA s přídatným HW pro ruční navádění robotu



Obrázek 5: Kolaborativní roboty Universal Robot UR3e (vlevo) a Fanuc CRX-10iA (vpravo)

Ruční navádění robotu

Koncepce ručního navádění robotu, tzv. hand-guidance je založena na využití standardní 3D myši původně určené pro CAD nástroje, viz Obrázek 6. 3D myš je umístěna na koncovém efektoru robotu a propojena s řídicím systémem robotu za účelem převzetí kontroly nad pohybem robotu. Pohyb robotu je tak ovládán přímo tažením za 3D myš narozdíl od standardních přístupů pohybu robotu prostřednictvím tzv. teachpandantu.

Myšlenka využití 3D myši pro polohování robotu zahrnuje dvě klíčové otázky:

- Umístění standardní 3D myši na koncový efektor robotu
- Napojení signálů z 3D myši a jejich interpretace v řídicím systému robotu



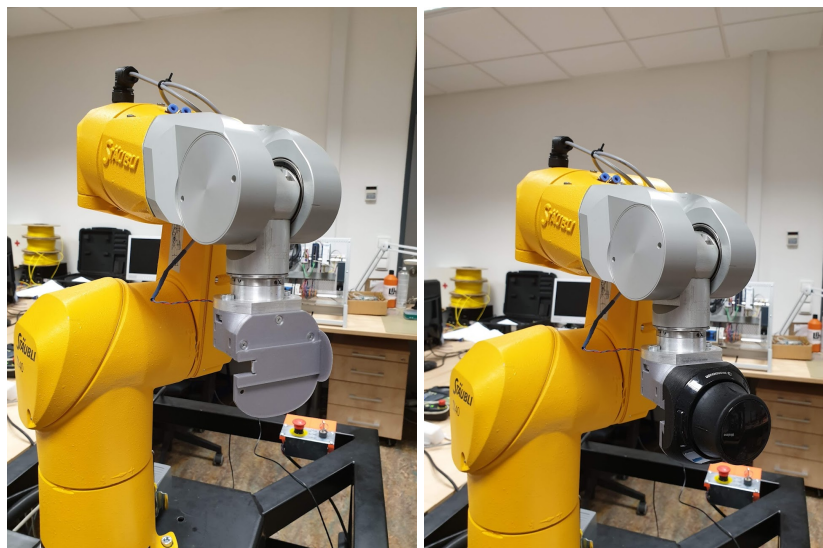
Obrázek 6: Bezdrátová 3D myš “3Dconnexion SpaceMouse Wireless”

Mechanické umístění 3D myši na robot

Předpokládá se montáž myši za poslední kloub robotu - na koncový efektor společně s používaným nástrojem (např. právě laserový dálkoměr). Pouze tak je možné polohovat ve všech stupních volnosti v prostoru. Samotná montáž 3D myši by měla splňovat následující požadavky:

- Modulární odnímatelný systém - samotnou myš není vhodné nechávat na robotu trvale, při dlouhodobém automatickém provozu
- Systém uchycení myši k robotu (zejména pak část, která zůstává na robotu trvale) by měl v co nejmenší míře překážet při cílové aplikaci s robotem
- Komunikace s řídicím systémem robotu by měl být ideálně bezdrátová
- Možnost připojení myši místo na koncový efektor robotu do konzole pro pohyb s robotem v módu "dálkové ovládání" (operátor nemusí být v bezprostřední blízkosti robotu)

Na Obrázcích 7, 8 je ukázán prvotní koncept umístění myši na koncový efektoru komerčního robotu Staubli TX40 a na koncový efektor prototypu robotu vyvinutého v rámci minulého řešeného projektu (FV10044: Výzkum a vývoj pokročilé kolaborativní robotické platformy a její aplikace ve výrobě elektronických komponent) s hlavním řešitelem projektu IMI. Obrázek 9 demonstruje možnou podobu konzole k uchycení myši pro dálkové ovládání.



Obrázek 7: Koncový efektor robotu Staubli TX40 s osazenou konzolí pro připojení 3D myši



Obrázek 8: Koncový efektor prototypu robotu vyvinutého v rámci projektu FV10044 s osazenou konzolí pro připojení 3D



Obrázek 9: 3D myš s konzolí pro dálkové ovládání

Propojení 3D myši s řídicím systémem robotu

Uvažovaný systém 3D myši je určený pro připojení ke standardnímu PC prostřednictvím USB konektoru a je běžným USB HID² zařízením. Připojení ke kontrolerům průmyslových robotů a integrace do jejich činnosti je tak v podstatě vyloučená s výjimkou, kdy by výrobce kontroleru nativně podporoval použití uvažované 3D myši (takový případ jsme dosud nenalezli).

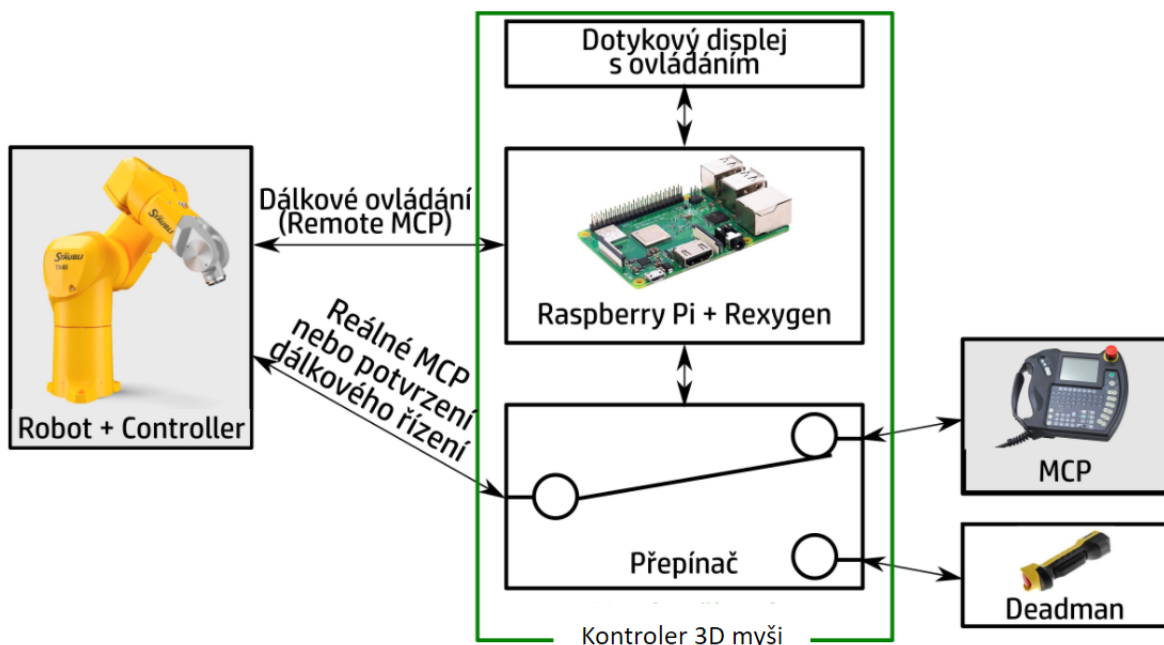
Koncepce propojení 3D myši s kontrolerem robotu za účelem jeho ovládání operátorem je založena na přídavném zařízení, dále jen *kontroler 3D myši*, které je vybaveno vlastním výpočetním HW a dedikovaným SW. Toto zařízení realizuje v podstatě rozhraní umožňující jak provoz vybraného robotu v běžném režimu tak v režimu převzetí kontroly nad robotem a jeho polohování 3D myší.

² USB Human Interface Device: https://en.wikipedia.org/wiki/USB_human_interface_device_class

Na Obrázku 10 je schematicky znázorněno propojení kontroleru 3D myši s robotem Staubli. V tomto případě je 3D myš propojena přes bezdrátový USB dongle s kontrolerem 3D myši, samotný kontroler je vřazen mezi kontroler robotu a jeho teachpendant (MCP) a zároveň připojen přes TCP (Modbus) ke kontroleru robotu.

Kontroler 3D myši umožňuje 2 režimy funkce:

1. Kontroler 3D myši je deaktivovaný a ke kontroleru robotu jen přímo připojuje teachpendant => standardní použití robotu
2. Kontroler 3D myši je aktivovaný, odpojuje teachpendant, aktivuje robot do režimu tzv. *Remote MCP* režimu a přebírá kontrolu nad robotem => přes komunikaci Modbus posílá robotu z nadřazeného řídicího systému (dedikovaný SW kontroleru 3D myši) požadavky na pohyb (translaci a rotaci) v jednotlivých osách koncového efektoru. Požadavky na pohyb robotu jsou nadřazeným řídicím systémem generovány na základě znalosti umístění 3D myši na robotu či mimo něj a aktuálním zásahu operátora (interakce operátora s joystickem 3D myši).



Obrázek 10: Koncept napojení kontroleru 3D myši k robotu Staubli

Dedikovaný SW kontroleru 3D myši bude plnit následující funkci:

- Implementuje komunikační rozhraní mezi USB HID zařízením (3D myši) a systémem následného zpracování dat
- Umožňuje konfiguraci kontroleru 3D myši, např. režimy ovládaní robotu (dálkový, myš přímo na robotu), citlivost myši při pohybu robotu, omezující podmínky (např. zámek některých stupňů volnosti), atd.
- Umožňuje zaznamenávat polohu robotu během učení (diskrétně, kontinuálně) za účelem dalšího zpracování viz [2]

Implementace dedikovaného SW kontroleru 3D myši se předpokládá v řídicím systému reálného času REXYGEN³.

³ www.rexygen.cz

V současnosti byly prozkoumány možnosti polohování robotu prostřednictvím 3D myši následující roboty:

- **Roboty Staubli:** Pro roboty Staubli jsou v současnosti dostupné dva přístupy:
 - Výše zmíněný přístup přes 3D kontroler robotu, který přebírá funkci teachpendantu v okamžiku učení. Toto řešení nevyžaduje zásah do standardního HW vybavení robotu, ale jen přítomnost dílčích SW rozšíření kontroleru robotu (běžně dodávané výrobcem)
 - Přístup s využitím HW rozšíření robotu kartou uniVAL drive, která umožňuje robotu komandovat přímo v kloubových polohách přes rychlou (2 ms) synchronní komunikaci založenou na protokolu EtherCAT. Kontroler robotu pak plní jen základní funkci (regulace na nejnižších vrstvách, bezpečnost, atd.) a řízení pohybu (včetně matematického základu výpočtu kinematických úloh) je realizováno nadřazeným řídicím systémem (kontroler 3D myši je součástí takového nadřazeného řízení).
- **Universal Robots:** Řízení na roboty UR lze převzít prostřednictvím do robotu integrované funkce *Real-Time Data Exchange* - výměna dat ve smyslu posílání požadavků a čtení aktuálních hodnot o poloze robotu v reálném čase s periodou 8 ms a funkce *Dashboard Server* - odesílání jednoduchých příkazů do robotu (např. zapnutí/vypnutí robotu, aktivace brzd, nouzové zastavení, atd.) a čtení stavu robotu. Opět je nutné použít nadřazený řídicí systém, který přebírá funkci původního kontroleru robotu
- **Roboty Fanuc:** Roboty Fanuc jsou z hlediska vzdáleného řízení pohybu poměrně uzavřené. Dílčí výsledky byly dosaženy při použití Options *Spline Motion* (Spline interpolace v robotu uložených datových bodů, toto řešení nelze využít pro uvažovanou taktilní zpětnou vazbu - řízení pohybu robotu 3D myši) a *Dynamic Path Modifier* (offset k pevně naplánované pohybové trajektorii robotu, který je v reálném čase komunikován přes rozhraní EthernetIP z nadřazeného řídicího systému - kontroleru 3D myši).
Poměrně nedávno uvedený Option *Streaming Motion* je v současnosti v procesu analýzy možností pro ovládání robotu v reálném čase z nadřazeného řízení.

Reference

- [1] A. Jáger, A. Boublerle: *Analýza požadavků na pilotní aplikaci (systémová analýza)*, technická zpráva, IMI, 2022.
- [2] M. Švejda, A. Jáger: *Koncepce programové podpory zpracování naučených pohybů robotu*, technická zpráva, ZČU, 2022.