

3D Vision systémy v průmyslové robotice

Jakub Müller ¹, Lukáš Vítek ¹, Tomáš Broum ¹, Miroslav Malaga ¹

¹ Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra průmyslového inženýrství a managementu
Univerzitní 8, Plzeň, 306 14, Česká republika
mullerja@kp.v.zcu.cz
lukasvitek@seznam.cz
broum@kp.v.zcu.cz
malaga@kp.v.zcu.cz

Anotace: Strojové vidění je metoda využívající systém jedné či více kamer, pomocí kterého je možné objekty automaticky kontrolovat, analyzovat a provádět s nimi různé pohybové úlohy. Zařízení a senzory zprostředkovávají potřebná data pro řídicí systém, kde jsou vyhodnocena pro vykonání úloh pro dané zařízení. 3D vision systémy využívají strojového vidění a jsou integrovány do robotických zařízení, které najdou uplatnění ve strojírenství, automotive a dalších průmyslových odvětvích.

1 Úvod

Vstup průmyslových robotů do 3D vize přináší zásadní změny v jejich schopnostech a využití. Tradiční průmyslová robotika se zaměřovala na rutinní úkoly ve statickém prostředí, avšak díky 3D vizi se otevírá nový svět možností. 3D Vision systémy umožňují robotům vnímat a analyzovat trojrozměrný prostor kolem sebe, což vede k preciznějším a flexibilnějším operacím v dynamických a nepředvídatelných scénářích. Spojení robotů a 3D vision procesů nejen zvyšuje produktivitu a spolehlivost průmyslových procesů, ale také otevírá dveře pro inovativní aplikace napříč různými odvětvími.

Cílem tohoto článku je seznámení se s 3D vision systémy v průmyslovém inženýrství a konkrétněji zejména v průmyslové robotice. Tento článek se skládá ze čtyř kapitol, které se zaměřují na 3D vision systémy. Přesněji se zaměřují na princip využití získaných informací z 3D vision systémů a základními metodami triangulace, optické interferometrie a metoda času letu (ToF). V závěru článku jsou shrnuty jednotlivé kapitoly.

2 Princip 3D vision systémů

Strojové vidění (machine vision) je důležitým pojmem pro průmyslové inženýrství z důvodu zpřístupnění smyslu vidění vybraných strojům a zařízením. Strojové vidění spojuje prvky hardwaru, optických senzorů a softwaru se stroji. Stroje by jednou měly být vybaveny stejnými vizuálními schopnostmi jako lidé, čehož je obtížné docílit vzhledem ke komplexitě našeho vizuálního systému, tj. propojení očí a mozku. [1]

Na vývoji zlepšování a obnovy obrazu se podílel zejména Dr. Nathan a jeho tým z agentury NASA, kteří vyvinuli program pro medicínu za účelem zobrazování a zpracování obrazu. Strojové vidění v průmyslovém inženýrství se často používá ke kontrole výrobků, která nevyžaduje hlubší porozumění a vyhodnocuje, zdali je výrobek dobře nebo špatně vyroben. [1]

Strojové vidění ve výrobě se používá pro následující klíčové technologie: pořizování obrazu, předzpracování obrazu, zpracování obrazu, segmentaci obrazu, rozpoznávání a detekci obrazu. Jeho využití lze nalézt také například v oborech svařování a montáže, kde pozice výrobku vzhledem k robotu může i nemusí být pevná. [2]

Strojové vidění souvisí s principy 3D systému, které se používají v průmyslové praxi např. na vyhodnocení kvality výrobků, kontroly povrchů nebo kontrol na montážních a výrobních pracovištích. Dalším využitím je rozpoznávání 3D předmětů anebo zabezpečení prostoru při navigaci. [3]

Problém u měřících a zobrazovacích zařízení nejčastěji nastává s výpočtem třetí souřadnice v prostoru (z). Tuto informaci je možné získat pomocí hlavních 3 principů, tj. triangulace, optické interferometrie a měření doby letu modulovaného světla. Tyto principy zároveň představují techniky optického měření. [3]

3 Triangulační metoda

Triangulace je často používanou metodou a rozlišuje se na následující techniky [3, 4]:

- aktivní triangulace,
- pasivní triangulace,
- měřicí systémy s teodolitem,
- fokusovací techniky,
- techniky "podoba ze stínování".

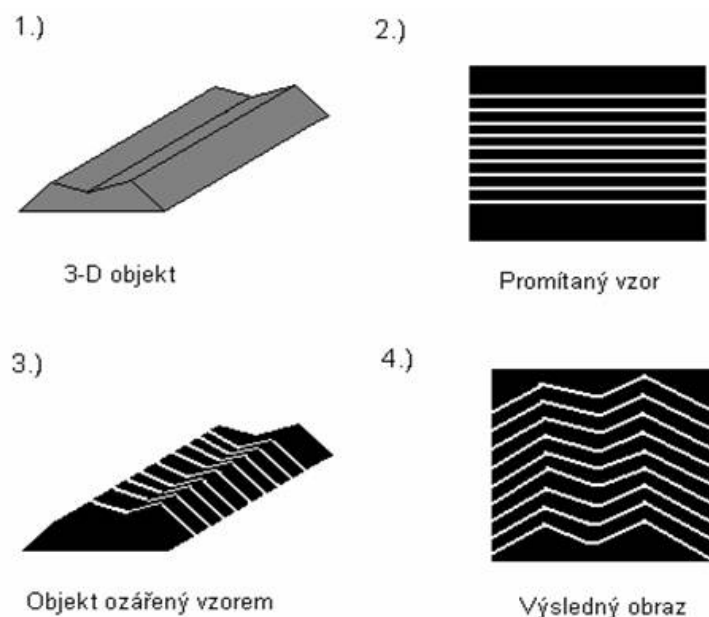
3.1 Aktivní triangulace

Techniky aktivní triangulace spočívají ve fotogrammetrické rekonstrukci snímaného objektu nasvícením jeho povrchu světelným zdrojem a současným snímáním CCD snímačem [3].

K označení povrchu se používají metody [3]:

- světelný paprsek (1D triangulace),
- světelný pruh (2D triangulace),
- strukturovaný světelný svazek (3D triangulace)

Metoda strukturovaného světla je zobrazena na Obrázek 1, kde lze podle deformací určit tvar.



Obrázek 1 - Technika světelného vzoru (3D triangulace) [3]

Použijeme-li strukturovaný světelný svazek, je celý objekt označen najednou, což je velká výhoda oproti metodám 1D a 2D triangulace, kdy je třeba pracně a zdlouhavě skenovat scénu [3].

Mezi techniky založené na 3D triangulaci patří [3]:

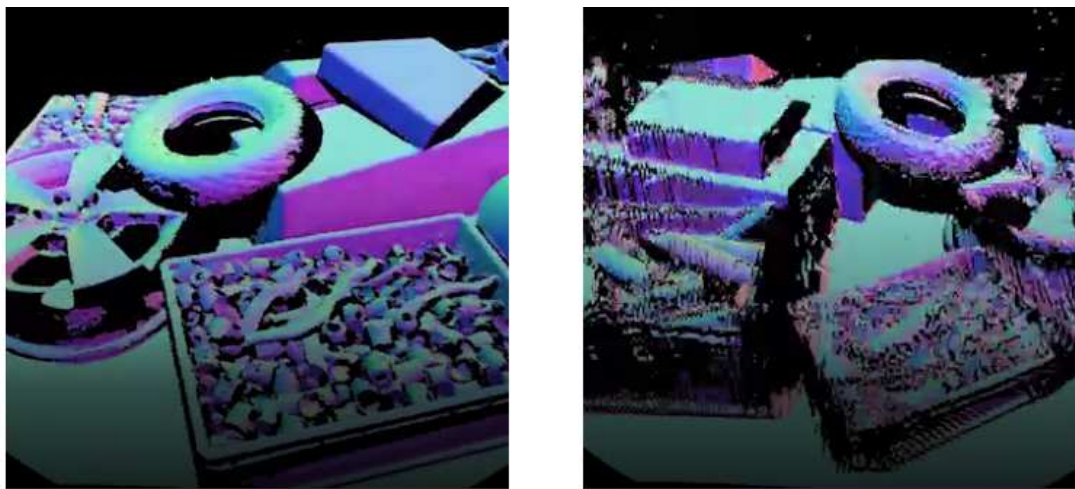
- technika moiré,
- technika světelného vzoru,
- technika barevného kódu,
- technika fázového posuvu.

Úskalí metody triangulace jsou dle [5] definovány jako konkavitu objektu, plochy kolmé na obrazovou rovinu, plochy rovnoběžné ke zdroji světla, povrch (materiál, barva).

Rozlišení závisí dle [5] na faktorech měrné vzdálenosti, velikosti báze b , úhlu, rozlišení kamery, ohniskové vzdálenosti f objektivu

Pro odhad hloubky strukturovaného světla je nutné zjistit polohu promítaného bodu v rovině obrazu, mít k dispozici vzdálenost mezi kamerou a světelným projektorem, vnitřní parametry kamery a polohu projektoru v prostoru. Strategie promítání bodů by byla v praxi pomalá, protože je nutné promítnout bod pro každou pozici, která je v obraze reprezentována jako pixel. Efektivnější strategií je promítat světlo jako pruh, který je spojen s různými kódovacími strategiemi, jako je binární kódování. Strukturované světlo, může snížit počet snímků potřebných pro kódování k vytvoření úplné hloubkové mapy. Lze ji také kódovat pomocí RGB kamery. Obvykle mají nízký dosah (maximálně 10 m). Příkladem tohoto typu jsou kamery Matterport, Kinect v1 a RealSense SR300. [6]

Výsledný rozdíl mezi základními metodami strukturovaného světla je vidět na obrázku níže.



Parallel Structured Light

Structured Light

Speed ● ● ● ● ●

● ● ○ ○ ○

Quality ● ● ● ● ●

● ● ● ● ●

Obrázek 2 - Metody strukturovaného světla porovnané dle rychlosti a kvality záznamu [7]

Paralelní strukturované světlo je nová metoda dosahující lepších výsledků pomocí speciálního obrazového snímače CMOS s mozaikovým vzorem pixelů. Na rozdíl od metody strukturovaného světla mají systémy "paralelního strukturovaného světla" po celou dobu zapnutý laser vycházející z projektoru. To, co se během expozičního okna zapíná a vypíná, jsou jednotlivé pixely snímače. K modulaci pixelů tedy dochází přímo ve snímači, nikoli v projekčním poli, jako je tomu u metody strukturovaného světla. To znamená, že individuálně kódované světelné vzory jsou ve snímači vzorkovány v jednom časovém okamžiku a v jednom snímku, což umožňuje zachytit objekty, které jsou v pohybu. [8]

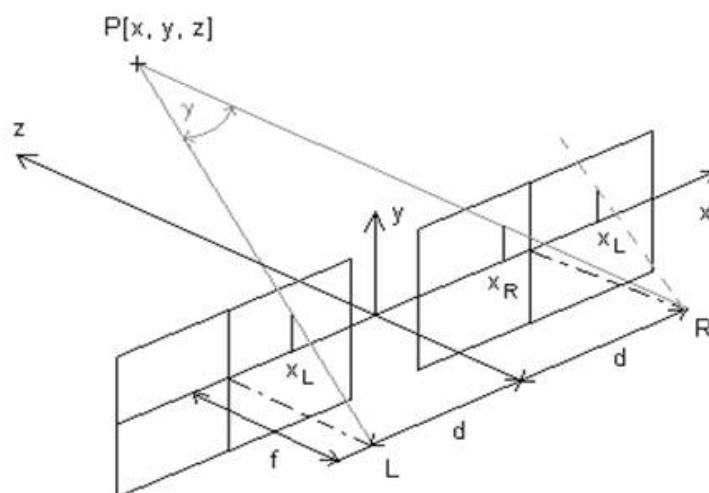
Tento nový přístup umožňuje celou řadu nových aplikací strojového vidění a úloh, které lze automatizovat. Robotická manipulace s objekty, vychystávání do zásobníků, třídění, obsluha strojů, paletizační a de-paletizační úlohy nebo kontrola kvality, inspekce a metrologie již nejsou omezeny na statické úkony. Systémy "paralelního strukturovaného světla" jsou schopny zachytit, rozpoznat a lokalizovat pohybující se objekty jako například krabice, potraviny nebo bez tvaré předměty přijíždějící po dopravníkovém pásu, a umožnit přesnou navigaci robota, aby je mohl vybírat nebo provádět jiné úkony manipulace s objekty. Tento systém umožňuje snímat objekty pohybující se rychlostí až 140 km/h a poskytuje rozlišení mračna bodů 0,9 Mpx (a 2 Mpx ve statickém režimu). [8]

3.2 Pasivní triangulace

Pasivní triangulační techniky zahrnují různé formy digitální fotogrammetrie. "Pasivní" znamená, že není uvažováno geometrické uspořádání osvětlení. Používají se tyto základní metody [3]:

- více kamer se známou orientací,
- více kamer se samokalibrací,
- jedna kamera v různých polohách se samokalibrací.

Jednoduchou a často používanou technikou je stereovize (stereofotogrammetrie, stereovidění), což je speciální podskupina metod s více kamerami. Stereoskopické snímky jsou dva perspektivní obrazy. Důležitý je úhel, který svírají oba sdružené paprsky, tzv. úhlová paralaxa (viz. úhel γ na Obrázek 3). [3]



Obrázek 3 - Stereoskopické snímky [3]

Souřadnice ze snímků lze určit dle následujícího vztahu:

$$x = x_L \frac{2d}{x_L - x_R}, \quad y = y_L \frac{2d}{x_L - x_R}, \quad z = \frac{2df}{x_L - x_R}, \quad (1)$$

kde, $2d$ je vzdálenost mezi optickými osami kamer, f je jejich ohnisková vzdálenost, x a x_P jsou souřadnice řešeného bodu v obrazové rovině $z = 0$ [3].

3.3 Měřicí systémy s teodolitem

Teodolit je přesný triangulační systém, který je schopný měřit s relativní chybou pod $5 \times 10^{-6} \%$, ale s dlouhou dobou měření. Souřadnice 3D jsou určeny z měřených úhlů a ze známých pozic minimálně dvou teodolitů [3]. Příklad moderního teodolitu pro měření úhlu s přesností 0.5 šedesátinné vteřiny je na Obrázek 4.



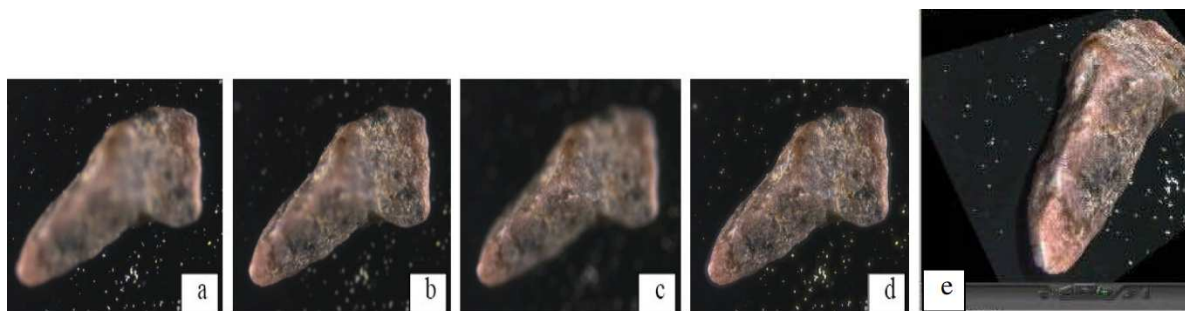
Obrázek 4 - Průmyslový teodolit Leica TMS6100A [9]

3.4 Fokusovací techniky

Důležitými parametry u těchto technik jsou hloubka ostrosti a průměr kroužku vzniklého difrakcí v ohniskové rovině, který závisí na ohniskové vzdálenosti a numerické apertuře. Existují tři různé metody [3]:

- konfokální mikroskopie,
- kontrolované fokusování,
- metody rozfokusování.

K získání 3D obrazu je potřeba provést skenování ve všech třech směrech (x, y, z), viz. Obrázek 5 [3].



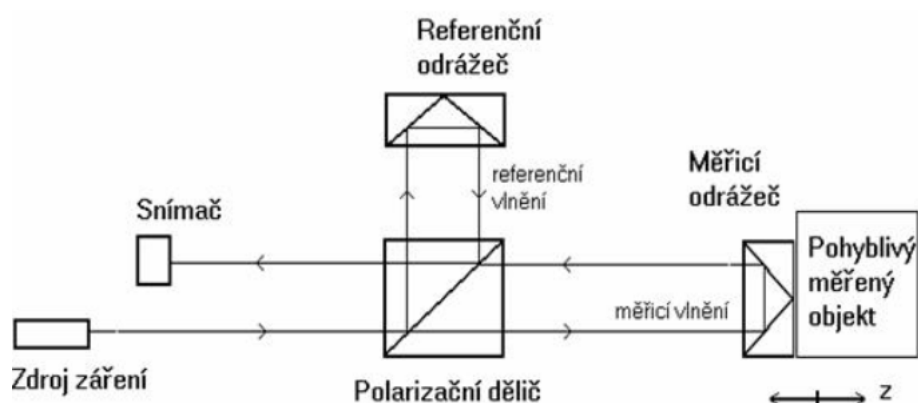
Obrázek 5 - Fokusovací technika – a,b,c,d) snímky s různým zaostřením, e) zrekonstruovaný objekt. [5]

4 Optická interferometrie

Metody jsou založeny na principu měření doby letu koherentního záření, kdy je vlnění rozděleno na měřicí (signálové, předmětové) a referenční [3].

Spojí-li se vlna rozptýlená od předmětu s referenční vlnou, mohou spolu interferovat [10], vzniklá vlna je definována následně pomocí následující rovnice (2).

$$I(x, y) = |I_1(x, y)|^2 + |I_2(x, y)|^2 + 2 * |I_1(x, y)| * |I_2(x, y)| * \cos(j_1 * (x, y) - j_2 * (x, y)) \quad (2)$$

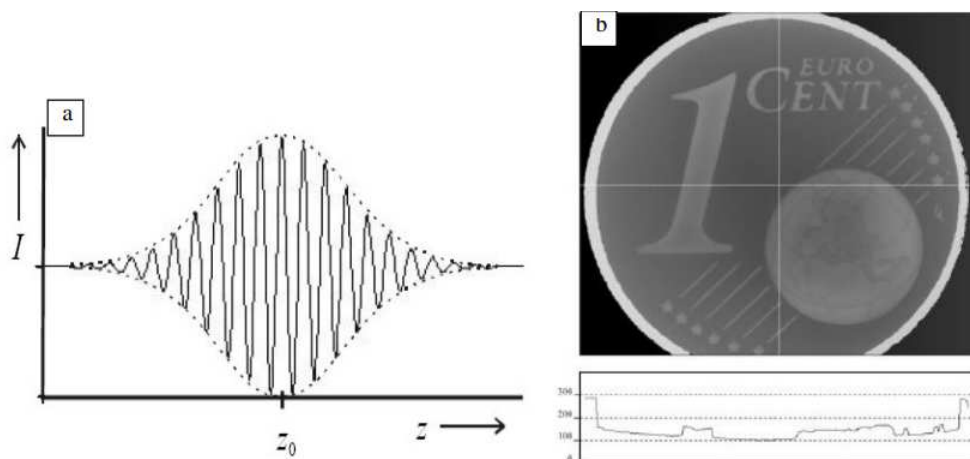


Obrázek 6 - Blokové schéma interferometru [3]

Nejvýznamnější principy založené na základech optické interferometrie jsou [3]:

- interferometrie pracující s více vlnovými délkami,
- holografická interferometrie,
- skvrnová interferometrie,

Příklad interferometrie s bílým světlem je zobrazena na Obrázek 7.



Obrázek 7 - Interferometrie s bílým světlem: a) závislost intenzity světla na pozici předmětového zrcadla (korelogram), b) změřený výškový profil mince (výšková mapa) [5]

5 Metody měření na principu doby letu modulového světla, ToF

Vzdálenost bodu objektu, resp. jeho z-ovou souřadnici, lze jednoduše stanovit z doby letu t světelného paprsku od jeho vyslání senzorem, odražení od objektu až po jeho opětovné zachycení senzorem, a to podle vztahu (1), který platí i pro interferometrické měření vzdálenosti [3]:

$$z = c * \frac{\tau}{2} \quad (3)$$

V prvním případě je však měřena doba letu modulovaného optického signálu, který představuje skupinovou rychlost. Obvykle se toto provádí korelací s vhodným referenčním signálem. Rozlišujeme tyto druhy modulace signálů [3]:

- pulsní,
- pseudonáhodná,
- spojitá.

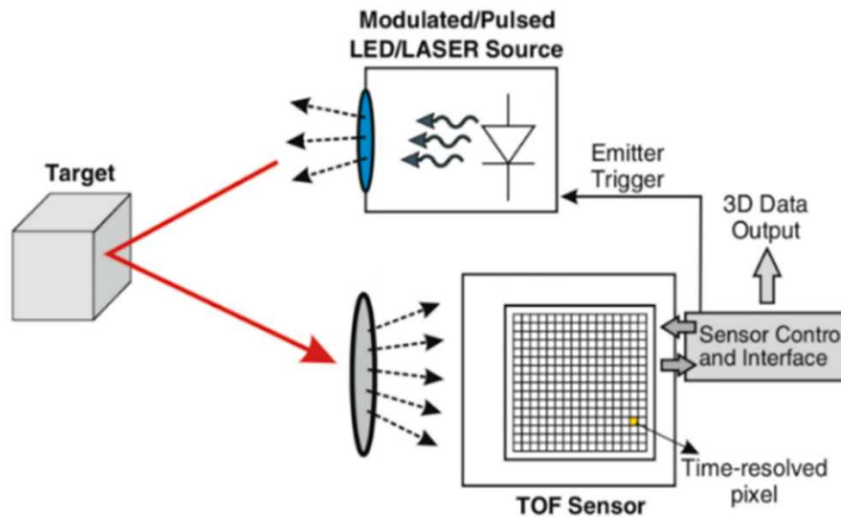
Nevýhodou těchto metod je skutečnost, že rychlost světla c je extrémně vysoká, z čehož vyplývají vysoké nároky na přesnost měřicího zařízení [3].

Metoda Času letu (Time of Flight, ToF) je založena na časové modulaci laserového paprsku generovaného 3D tvarem měřených objektů. Signál laserového impulsu je vysílán z vysílače, odráží se od povrchu měřených objektů a stejným způsobem se přenáší zpět do přijímače. Metodou lze měřit časový rozdíl mezi dobou od vyslání laserového impulsu do doby příjmu a vypočítat prostorovou vzdálenost. [11]

Pak se souřadnice X, Y a Z vypočítají dle následujícího vzorce [11]:

$$\begin{cases} X = P \cos \theta \cos \alpha \\ Y = P \cos \theta \sin \alpha \\ Z = P \sin \theta \end{cases}$$

Princip ToF je zobrazen na Obrázek 8. a rozdíl vůči metodě strukturovaného světla na Obrázek 9.



Obrázek 8 - Princip Času letu [11]



	Parallel Structured Light	Structured Light	ToF / Active Stereo
Speed	● ● ● ● ●	● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ●
Quality	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ○ ○ ○

Obrázek 9 - Rozdíl mezi ToF a metodou strukturovaného světla v rychlosti a kvalitě záznamu [7]

U ToF jsou jasové, vzdálenostní (hloubkové) informace detekovány společně, zjištění vzdálenosti je rychlé, ale méně přesné [12].

Princip strukturovaného světla je používán v senzorech, které se také nazývají aktivní stereo senzory. Ty využívají projektor světla zachyceného kamerou a hloubku tohoto bodu lze měřit technikou zvanou triangulace. [4, 6]

6 Závěr

Vývoj v oblasti 3D vize stále pokračuje a s ním přicházejí nové algoritmy, senzory a technologie, které rozšiřují možnosti robotických systémů ještě více.

Průmyslová robotika se tak stává neodmyslitelným prvkem moderní výroby a automatizace, kde roboti nejen plní předem definované úkoly, ale aktivně spolupracují s lidskými pracovníky a přizpůsobují se různorodým situacím. 3D Vision systémy v průmyslové robotice reprezentují průlomovou technologii. Díky schopnosti vnímat a interpretovat trojrozměrný svět získávají roboti novou úroveň flexibility, přesnosti a schopnosti přizpůsobit se proměnlivým podmínkám. Tato technologie má nejen zásadní dopad na efektivitu a spolehlivost průmyslových operací, ale také rozšiřuje možnosti robotické automatizace do oblastí, které dříve byly těžko dosažitelné.

Na začátku práce byly prozkoumány principy 3D Vision systémů a jakými způsoby roboti získávají informace o svém okolí ve třech dimenzích. Dále byla popsána triangulační metoda, která je základem mnoha 3D Vision systémů, umožňující přesné určení vzdálenosti objektů založené na geometrických principech.

Kapitola optická interferometrie popisuje složitější, avšak mimořádně přesný způsobem měření. Tato metoda umožňuje detekci i těch nejjemnějších změn v prostoru a má široké uplatnění ve vědeckém výzkumu a přesných průmyslových aplikacích.

Nakonec byla popsána metoda měření na principu doby letu modulového světla. Tato technika umožňuje rychlé a přesné získávání trojrozměrných dat díky analýze času, za který světlo putuje od zdroje k cíli a zpět.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen za podpory projektu SGS-2023-025 s názvem "Ekologicky udržitelná výroba" řešeného v rámci Interní grantové agentury Západočeské univerzity v Plzni.

Použitá literatura

- [1] AWCOCK, G. J., THOMAS, R. Design of Industrial Machine Vision Systems, *Applied Image Processing*, pp. 1-24, 1995.
- [2] FU, L., ZHANG, Y., HUANG, Q. CHEN, X. Research and application of machine vision in intelligent manufacturing. In: *Chinese Control and Decision Conference, CCDC*, pp. 1126-1131, 2016.
- [3] KALOVÁ, I., HORÁK, K. *Optické metody měření 3D objektů* [online]. 2005 [citace 25. 4. 2023]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html#kap4>.
- [4] JAHNE, B., HAUSECKER, H. GEISLER, P. Handbook of computer vision and applications, *Sensors and Imaging*, sv. 1, pp. 1-657, 1999.

- [5] RICHTER, M. *Optické metody rekonstrukce 3D objektů* [online]. 2019 [citace 20. 5. 2023]. Dostupné z: <https://www.uamt.fekt.vut.cz/~richter/vyuka/MPOV/3Dmereni.pdf>.
- [6] LOPES, A., SOUZA, R., PEDRINI, H. A survey on RGB-D datasets, *Computer Vision and Image Understanding*, sv. 222, č. 103489, 2022.
- [7] PHOTONEO, *MotionCam-3D Color* [online]. Photoneo s.r.o., 2023 [citace 25. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.photoneo.com/motioncam-3d>.
- [8] PUFFLEROVA, A. *Parallel Structured Light Addresses Limitations of Standard 3D Sensing* [online]. WTWH Media LLC, 29 červen 2021 [citace 25. 4. 2023]. Dostupné z: <https://www.roboticsbusinessreview.com/opinion/parallel-structured-light-addresses-limitations-of-standard-3d-sensing/>.
- [9] HEXAGON, *Průmyslový teodolit Leica TMS6100A* [online]. Hexagon, 2023 [citace 21. 4. 2023]. Dostupné z: <https://hexagon.com/cs/products/leica-tm6100a-industrial-theodolite>.
- [10] ŠIŇOR, M. *Interference světla* [online]. 1998 [citace 21. 4. 2023]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/node7.html>.
- [11] SHANG, H., LIU, C., WANG, R. Measurement methods of 3D shape of large-scale complex surfaces based on computer vision: A review. *Measurement*, sv. 197, č. 111302, 2022.
- [12] RICHTER, M. *3D techniky počítačového vidění* [online]. 2019 [citace 22. 4 2023] Dostupné z: https://www.uamt.fekt.vut.cz/~richter/vyuka/1718_POV/POV_3D_17.pdf.