

Assessment of the bachelor thesis by Nikita Litvishko

## **Reconstruction of Spheres in 3D for Robot Calibration**

doc. Ing. Tomas Pajdla, Ph.D.  
bachelor thesis supervisor

The goal of the thesis was to develop a technique for reconstructing the pose of touching spheres in space from their images in a single perspective image. This is a problem related to robot and manipulator calibration when the knowledge of sphere poses allows to close a kinematic chain and thus calibrate parameters of a manipulator.

The thesis reviewed the geometry of perspective camera, second order curves and surfaces in images and in the space, and the sphere projection to an image. The review is correct and adequately presented.

The main contribution of the thesis is in developing a method for computing the pose of a sphere in space from its image. The method is presented in Chapter 3 and experimentally verified in Chapter 4. Experimental verification is reasonably structured and shows the quality that can be achieved with different types of spheres in practice.

On the positive side, I have to value that Nikita Litvishko was able to grasp the topic and propose a technique for sphere pose computation from a single image. He also evaluated his method in the situation with single as well as with two spheres.

On the negative side, we see that the language of the thesis still needs to be improved. Also, the constraint of two touching spheres has not really been exploited in the estimation.

Nikita Litvishko had somewhat cold start and it took us some time to reach efficient collaboration. Nevertheless, as time went, he become more and more efficient. Nevertheless, he still has to work hard to match best students at his level of studies.

To conclude, Nikita Litvishko presented a useful engineering work and sufficiently fulfilled the goals set in the assignment. His work is not excellent but quite solid. Therefore, I recommend grading the thesis by the *very good grade B*.

Prague, 10 June 2014

doc. Ing. Tomas Pajdla, Ph.D.  
Thesis supervisor

# Posudek oponenta bakalářské práce

**Student:** Nikita Litvishko

**Název práce:** Reconstruction of Spheres in 3D for Robot Calibration

**Oponent:** Ing. Martin Matoušek, Ph.D.

Předložená práce se zabývá metodou určení 3D polohy koule známého průměru pozorované kalibrovanou projektivní kamerou. Problém je motivován kalibrací robotické ruky vůči kameře, na jejímž konci je v průběhu kalibrace koule umístěna. Zadání považuji za zajímavé, středně obtížné a vhodné ke zpracování formou bakalářské práce.

**Formální hodnocení textu práce.** Práce je prezentována kultivovaně dle zvyklostí technického textu, při čtení jsem zaznamenal jen nemnoho drobných prohřešků proti konzistenci značení, např.: kap. 1 – '2d' versus '3D'; strana 10 – vektor 'a' by měl být značen jako vektor  $\mathbf{a}$ ; rovnice (3.1.6) a text pod ní – ' $\theta$ ' versus ' $\Theta$ '. Text je psán srozumitelně, v jazyce anglickém.

**Věcné hodnocení textu práce.** V první polovině kapitoly 2 je stručně popsána geometrie perspektivní kamery a odvození projekce 3D prostorového bodu na 2D obrazový bod. Tato část je správná, nicméně pro potřeby práce se jeví nadbytečná, neboť prezentovaná metoda je založena na projekci koule (jako speciálního případu kvadriky) do obrazu. Výsledné projekční rovnice jsou v kapitole 2 uvedeny, ale bez vazby či odvození plynoucího z bodové projekce.

Postup rekonstrukce koule z jejího obrazu v kapitole 3 je správný. K této části mám dotaz: koule se do obrazu promítá jako elipsa, jejíž orientace a excentricita není libovolná, ale závisí na poloze v obraze (a kalibrační matici kamery). Bylo toto omezení použito při hledání elips v obraze? Pokud ne, bylo by vhodné jej použít?

V experimentální sekci je závažnější hodnota chyby vypočtené polohy koule od polohy referenční. Chyba je největší ve směru osy  $x$ , očekával bych největší chybu ve směru osy  $z$ . Například pro vzdálenost 420 mm je vektor chyby  $[x, y, z] = [4.4, 0.1, 0.86]$  (mm). Uvažujeme-li obr 4.2, koule o průměru 54 mm ve vzdálenost 420 mm je zobrazena elipsou velikosti cca 540 px, čemuž při ohniskové vzdálenosti  $f = 4200$  odpovídá citlivost určení polohy cca 0.1 mm/px ve směru  $x$  či  $y$ , a 0.77 mm/px ve směru  $z$ . Pro druhou použitou vzdálenost 710 mm pak citlivost bude cca 0.16 mm/px pro  $x, y$ , a 2.2 mm/px pro  $z$ . Změřené chyby  $d_{420}$  a  $d_{710}$  jsou s tímto konzistentní (pro chybu detekce v obraze cca 1 px), výrazně větší chyba ve směru  $x$  ukazuje, že referenční poloha koule zřejmě nebyla správně určena. Experiment vyhodnocující přesnost metody by měl být lépe navržen s ohledem na obtížnost přesného referenčního určení polohy středu koule, například pomocí dvou koulí dotýkajících se jak podložky tak sebe, s využitím známé vzájemné vzdálenosti. Vhodnější vyhodnocení nicméně přináší dále prezentovaný experiment s posuvným stolek.

Předloženou práci student prokázal schopnost samostatné technické práce. Zadání považuji za splněné, předloženou bakalářskou práci proto **doporučuji k obhajobě** a s ohledem na uvedené připomínky navrhuji hodnotit klasifikačním stupněm **B – velmi dobře**.

Praha, 13. června 2018

Ing. Martin Matoušek, Ph.D.

Oddělení robotiky a strojového vnímání, CIIRC, ČVUT