

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH  
PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA

INTERAKTÍVNE EXPONÁTY VO VEDECKÝCH  
CENTRÁCH

Bakalárska práca

**UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH**  
**PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA**

**INTERAKTÍVNE EXPONÁTY VO VEDECKÝCH**  
**CENTRÁCH**

**Bakalárska práca**

Študijný program:	Matematika - informatika
Študijný odbor:	9.1.1. - matematika, 9.2.1. - informatika
Školiace pracovisko:	Ústav informatiky
Vedúci práce:	RNDr. Matej Nikorovič

**Košice 2017**

**Richard Staňa**



Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach  
Prírodovedecká fakulta

## ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

**Meno a priezvisko študenta:** Richard Staňa  
**Študijný program:** Matematika - informatika (Medziodborové štúdium, bakalársky I. st., denná forma)  
**Študijný odbor:** 9.1.1. matematika  
9.2.1. informatika  
**Typ záverečnej práce:** Bakalárska práca  
**Jazyk záverečnej práce:** slovenský  
**Sekundárny jazyk:** anglický

**Názov:** Interaktívne exponáty vo vedeckých centrách  
**Názov EN:** Interactive Exponates in Science Centers  
**Cieľ:** 1. Analyzovať interaktívne exponáty s využitím virtuálnej alebo rozšírenej reality.  
2. Navrhnuť, implementovať a prakticky overiť vybrané interaktívne exponáty virtuálnej alebo rozšírenej reality.  
**Literatúra:** [1] SONKA, Milan; HLAVAC, Vaclav; BOYLE, Roger. Image processing, analysis, and machine vision. Cengage Learning, 2014.  
[2] HRDLICKA, Jan; WILD, Jiri. AUGMENTED REALITY FOR SMART HOMES: DEPTH CAMERA AND PROJECTOR CALIBRATION. SMART HOMES 20133, 23.  
[3] REED, S. E., et al. Shaping watersheds exhibit: An interactive, augmented reality sandbox for advancing earth science education. In: AGU Fall Meeting Abstracts. 2014. p. 01.  
[4] TOMORI, Zoltan; VANKO, Peter; VAITOVIC, Boris. Using of Low-Cost 3D Cameras to Control Interactive Exhibits in Science Centre. In: Emergent Trends in Robotics and Intelligent Systems. Springer International Publishing, 2015. p. 273-281.

**Kľúčové slová:** virtuálna realita, pridaná realita, kinect, projektor, hologram, herný engine

**Vedúci:** RNDr. Matej Nikorovič  
**Ústav :** ÚINF - Ústav informatiky  
**Riaditeľ ústavu:** prof. RNDr. Viliam Geffert, DrSc.  
**Spôsob sprístupnenia elektronickej verzie práce:** bez obmedzenia

**Dátum schválenia:** 03.05.2017

prof. RNDr. Viliam Geffert, DrSc.  
riaditeľ ústavu

## **Pod'akovanie**

Veľké pod'akovanie patrí môjmu vedúcemu práce RNDr. Matejovi Nikorovičovi za odborné rady a pripomienky, ktoré si veľmi vážim, a ktoré mi pomohli pri príprave tejto práce.

## Abstrakt

Práca sa zaoberá interaktívnymi exponátmi s využitím rozšírenej reality. Jej cieľom je vytvoriť prehľad existujúcich interaktívnych exponátov, implementovať a prakticky overiť niektoré z nich. Typickým príkladom interaktívneho exponátu je interaktívne pieskovisko [13]. Tento exponát využíva sústavu projektor-kamera, kde projektor osvetľuje objekty v scéne na základe vzdialenosti objektov v scéne získanej z pohľadu kamery. Na získanie vzdialenosti objektov v scéne sa používajú kamery s hĺbkovým senzorom, napríklad Microsoft Kinect For Windows.

Projektor a kamera sú rôzne zariadenia, ktoré majú rôzne pohľady, rozlíšenia, ... Pre korektné osvetľovanie scény projektorom je potrebná kalibrácia sústavy kamery a projektoru. To znamená nájsť zobrazenie z trojrozmerných súradníc kamery do dvojrozmerných súradníc projektoru. Z práce [11] sme prebrali spôsob odhadu zobrazenia, ktorý vyžaduje získať dostatočné množstvo korešpondujúcich párov bodov pozostávajúcich z 2D bodu v súradniciach projektoru a 3D bodu v súradniciach kamery.

Proces získavania týchto párov bodov je popísaný v prácach [23, 14]. Popisujú kalibráciu a získavanie korešpondujúcich párov bodov pomocou vysvietenia pravidelných útvarov do scény a ich následnou detekciou pomocou kamery. Tieto riešenia sú zdĺhavé, komplikované a vyžadujú veľké množstvo párov bodov. Navrhli sme vlastný spôsob získavania párov bodov pomocou kostry postavy získanej priamo z Kinectu. Naše riešenie je rýchle, jednoduché, nevyžaduje veľké množstvo párov bodov a je všeobecnejšie ako práce [23, 14]. Navrhli, implementovali a prakticky sme overili exponát ninja keyboard a hru ping-pong.

**Kľúčové slová:** *reálno-virtuálne kontinuum, rozšírená realita, Kinect, projektor, herný engine Unity.*

## Abstract

This paper deals with interactive exhibits using the augmented reality. Our goal is to create an overview of existing interactive exhibits, implement and practically verify some of them. A typical example of an interactive exhibit is the interactive sandbox [13]. The exhibit uses a projector-camera system where the projector illuminates objects in the scene based on the distance of objects in the scene obtained from the view of the camera. To acquire the distance there are used cameras with depth sensors, such as Microsoft Kinect For Windows.

Projector and camera are various devices that have different views, resolutions, ... To correct scene illumination by the projector there is necessary to calibrate the camera and projector system. This means estimating a transform from 3D points in camera coordinates to 2D points in projector coordinates. From paper [11] we took a way of estimating the transform that requires to obtain enough matching point pairs consisting of a 2D point in the projector coordinates and a 3D point in the camera coordinates.

The process of obtaining the pairs of points is described in papers [23, 14]. They describe the calibration and retrieval of matching point pairs by illuminating regular shapes in the scene and subsequently detecting them with the camera. These solutions are tedious, complicated and require a large number of point pairs. We have designed our own way of gaining point pairs using the character skeleton obtained directly from Kinect. Our solution is fast, simple, does not require a lot of point pairs and is more general than papers [23, 14]. We designed, implemented and practically verified the ninja keyboard exhibit and ping-pong game.

**Keywords:** *reality-virtuality continuum, augmented reality, Kinect, projector, game engine.*

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>7</b>
<b>1 Reálno-virtuálne kontinuum</b>	<b>8</b>
1.1 Virtuálna realita . . . . .	8
1.2 Mixovaná realita . . . . .	9
1.2.1 Rozšírená realita . . . . .	9
1.2.2 Rozšírená virtualita . . . . .	10
<b>2 Sústava projektor-kamera</b>	<b>12</b>
2.1 Kalibrácia projektor-kamera . . . . .	12
<b>3 Existujúce exponáty</b>	<b>15</b>
3.1 Dance + Projection Mapping . . . . .	15
3.2 Interaktívne pieskovisko . . . . .	15
3.3 Vykýře Play . . . . .	16
3.4 Augumeted Climbing Wall . . . . .	16
<b>4 Návrh a implementácia kalibrácie sústavy projektor-kamera</b>	<b>18</b>
4.1 Použitý hardware a software . . . . .	18
4.2 Návrh . . . . .	19
4.3 Implementácia . . . . .	20
<b>5 Návrh a implementácia interaktívnych exponátov</b>	<b>23</b>
5.1 Hra ping-pong . . . . .	23
5.2 Ninja keyboard . . . . .	24
<b>Záver</b>	<b>27</b>
<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>30</b>
<b>Prílohy</b>	<b>31</b>

# Úvod

Expozície v múzeach strácali na popularite. Na pritiahnutie pozornosti a za-traktívnenie expozícii začali exponáty interagovať s návštevníkmi, čo spôsobilo prevrat v návštevnosti. S interaktívnymi exponátmi sa dnes môžeme stretnúť aj na iných mies-tach. Napríklad hvezdárne, zábavne technické centrá (Steel park), festivaly (Európska Noc výskumníkov), expozície, ... Ich hlavnou úlohou je zaujať návštevníka a dať mu možnosť dotknúť sa exponátu s jeho následnou reakciou, vyskúšať si niečo na vlastnej koži. Keďže interaktívne exponáty sú v dnešnej dobe veľmi obľúbené, je tu možnosť ich využitia aj v školskom prostredí. Na rôzne prezentačné a popularizačné účely (deň ot-vorených dverí) alebo na lepšie pochopenie preberaného abstraktného učiva, napríklad pochopenie fyzikálnych javov pomocou dokreslenia imaginárnych objektov (siločiar, polí, toku elektrického prúdu, ...) do reality alebo ich zobrazením v inej (virtuálnej) realite.

Práca vysvetľuje rozdelenie realít a uvádza príklady interaktívnych exponátov. Venuje sa interaktívnym exponátom s využitím rozšírenej reality s použitím sústavy projektor-kamera. Pre použitie tejto sústavy je nutná jej kalibrácia, ktorá sa odhaduje na základe korešpondujúcich párov bodov kamery a projektora, ktorých získavanie je náročné. V práci analyzujeme existujúce riešenia, ktoré sa zaoberajú získavaním týchto párov bodov. Navrhujeme jednoduchší spôsob získavania dvojíc bodov a implementu-jeme ho. S využitím tejto kalibrácie implementujeme vybrané interaktívne exponáty.

Cieľom práce je vytvoriť prehľad existujúcich interaktívnych exponátov s využitím rozšírenej reality, vybrané exponáty implementovať a prakticky overiť ich funkčnosť.

V kapitole 1 je vysvetlený pojem reálno-virtuálne kontinuum a pojmy virtuálna realita, rozšírená realita a rozšírená virtualita. Kapitola 2 popisuje sústavu projektor-kamera a jej kalibráciu. V kapitole 3 je prehľad existujúcich interaktívnych exponátov využívajúcich sústavu projektor-kamera aj s ukážkami. Použitý hardware a software, vlastný návrh kalibrácie projektor-kamera a jej samotná implementácia je v kapitole 4. V kapitole 5 popisujeme návrh a implementáciu interaktívnych exponátov: hry ping-pong a ninja keyboard.

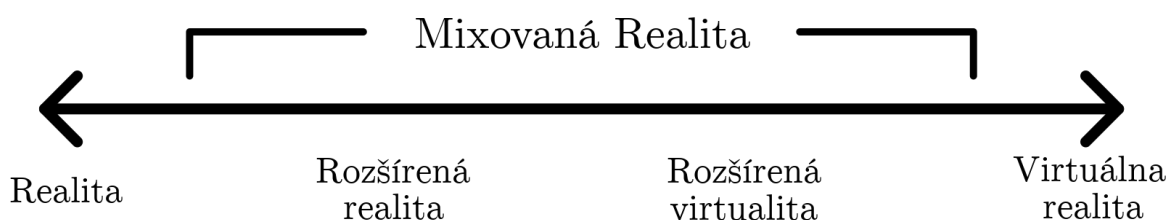


# 1 Reálno-virtuálne kontinuum

Ešte na konci minulého storočia pojmy virtuálna realita, rozšírená virtualita a rozšírená realita neboli veľmi v povedomí ľudí. Ak aj boli, tak sa vyskytovali v oblasti sci-fi. V dnešnej dobe sa s nimi stretol už takmer každý. No nie každý vie, čo znamenajú (respektíve, aký rozdiel je medzi nimi).

Všetky tieto pojmy sa spájajú do reálno-virtuálneho kontinua [19], ktoré sa skladá z troch častí:

- realita - reálny svet, v ktorom žijeme,
- mixovaná realita - delí sa na:
  - rozšírená realita,
  - rozšírená virtualita,
- virtuálna realita.



Obr. 1: Reálno-virtuálne kontinuum.

Reálno-virtuálne kontinuum popisuje vzťahy medzi jednotlivými realitami (realita, rozšírená realita, rozšírená virtualita, virtuálna realita), ktoré sú vyobrazené na obrázku 1. V nasledujúcich sekciách sú popísané jednotlivé časti virtuálno-reálneho kontinua.

## 1.1 Virtuálna realita

Virtuálna realita je počítačom vymodelované prostredie, ktoré simuluje skutočnosť. Jedným z účelov je vytvorenie virtuálneho zážitku. Vhodným príkladom je akákoľvek

počítačová hra, v ktorej sa hráč môže pohybovať vo virtuálnom priestore. Dnes sú k dispozícii špeciálne zariadenia pre virtuálnu realitu, vo väčšine prípadov headsety. Ich súčasťou môžu byť ďalšie periférie zaistujúce zvukovú a polohovú interakciu alebo hmatovú odozvu. Snažia sa stimulovať zmysly človeka tak, aby virtuálny zážitok bol čo najsilnejší. Príkladom populárnych zariadení sú Oculus Rift s ovladáčmi Oculus Touch[22], HTC Vive [12], Sony PlayStation VR [27], Google Cardboard [9], Samsung Gear VR [25] a iné. Ukážky niektorých zariadení je možné vidieť na obrázku 2.

So stimulovaním zmyslov sú spojené problémy, hlavne, ak sú stimulované iba niektoré z nich. Vtedy môže vznikať choroba spôsobená virtuálnou realitou a najčastejšie vzniká, pretože mozog nevie zosúladiť rôzne informácie získane zo zmyslov (simulácia zobrazuje pohyb, no polohový orgán žiadny pohyb nevníma). Niekedy je vyvolaná nízkou obnovovacou frekvenciou obrazu. Môže sa prejaviť bolesťou hlavy, nevoľnosťou, dezorientovanosťou, zvracaním, ...



Obr. 2: Oculus Rift s ovladáčmi Oculus Touch a Google Cardboard. Zdroj: [8, 9].

## 1.2 Mixovaná realita

Mixovaná realita spája reálne prostredie s virtuálnym prostredím. Jej výhodou je, že na rozdiel od virtuálnej reality v nej nevzniká choroba spôsobená virtuálnou realitou. V nasledujúcich sekciách popíšeme rozšírenú realitu a rozšírenú virtualitu.

### 1.2.1 Rozšírená realita

V prípade rozšírenej reality nehovoríme o úplnom vytváraní virtuálneho priestoru, ale o pridávaní virtuálnych objektov do skutočného prostredia. Podľa pohľadu na scénu vieme rozšírenú realitu rozdeliť na priamu (na scénu sa pozeráme priamo) a nepriamu (na scénu pozeráme nepriamo - cez displej). Existuje viacero zariadení, ktoré umožňujú pridávanie virtuálnych objektov do skutočného prostredia. Najčastejšie sa skladajú z kamery snímajúcej scénu a zobrazovacej jednotky.

Rozšírená realita je dosiahnuteľná aj pomocou bežného smartfónu, lebo obsahuje displej a kameru. Sú aplikácie pre mobilné platformy, ktoré používajú nepriamu rozšírenú realitu na rôzne účely: herné, reklamné alebo prezentačné. Na obrázku 3 je možné vidieť použitie nepriamej rozšírenej reality v hre Pokémon GO [21].



Obr. 3: Ukážka nepriamej rozšírenej reality. Chytanie pokémona v hre Pokémon GO. Zdroj: [3].

Príkladom použitia priamej rozšírenej reality je headset Microsoft HoloLens [17], ktorý obsahuje stereoskopický displej, kameru a ďalšie senzory. Na obrázku 4 vidieť použitie Microsoft HoloLens pri tvorbe dizajnu operačnej sály.



Obr. 4: Ukážka dizajnu operačnej sály pomocou Microsoft HoloLens. Zdroj: [6].

Najjednoduchším zariadením umožňujúcim priamu rozšírenú realitu je sústava projektor-kamera. Projektorom sa dokresľujú požadované objekty do scény snímanej kamerou. Táto práca sa venuje najmä interaktívnym exponátom s využitím tejto sústavy, preto je podrobnejšie popísaná v kapitole 2.

### 1.2.2 Rozšírená virtualita

V prípade rozšírenej virtuality ide o pridávanie reálnych objektov do virtuálnej reality. Príkladom rozšírenej virtuality v každodennom živote je predpoveď počasia.

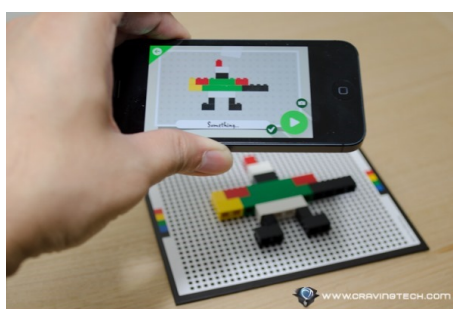
Virtuálnou realitou je v tomto prípade mapa zobrazujúca animáciu počasia a do nej je pridaná rosníčka, ktorá sa stáva súčasťou animácie. Ukážka je na obrázku 5.



Obr. 5: Predpoveď počasia. Zdroj: [29].

Pre lepšie pochopenie je možné predstaviť si reálnu budovu a tú istú budovu vymodelovanú prostriedkami počítača. Do tejto budovy je vložený dej hry. Pozícia hráča je prenášaná z reálneho sveta do virtuálneho pomocou senzorov nainštalovaných v budove a ďalších vstavaných v headsete. Hráč sa tak pohybuje vo virtuálnom svete, no získava aj haptickú odozvu z reálneho sveta (dotyk steny, nábytku, ...). Jedným z takýchto riešení je MSI VR One [20]. V tomto prípade hráč nosí rucksak, ktorý obsahuje výkonný počítač ovládaný headsetom.

Jednoduchším príkladom je hra Life of George od LEGA. Hráč má za úlohu postaviť zo stavebnice objekt, ktorý vidí v Georgovom fotoalbume. Následne ho nasníma kamerou a hra vyhodnotí, či sa objekty zhodujú. Ukážku z hry je možné vidieť na obrázku 6.



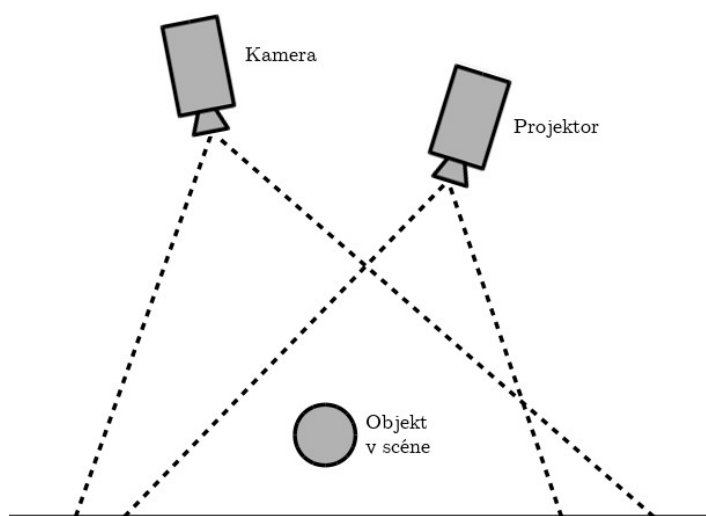
Obr. 6: Skenovanie vytvoreného objektu v hre Life of George. Zdroj: [5].

## 2 Sústava projektor-kamera

Vráťme sa naspäť k priamej rozšírenej realite, k sústave projektor-kamera, kde projektor osvetľuje objekty v scéne na základe pohľadu kamery. Na to, aby objekty v scéne mohli byť korektne osvetľované, je potrebné poznať ich pozíciu vzhľadom na projektor. Na zistenie pozície sa používajú špeciálne kamery využívajúce hĺbkový senzor. Medzi lacné a ľahko dostupné patria: Asus Xtion PRO Live [2], Creative Sens3D [7], Microsoft Kinect for Windows [15], Microsoft Kinect for Windows v2 [16]... Každá z týchto kamier nám dáva priestorový pohľad na scénu. Ale ako osvetľovať konkrétne objekty v scéne na základe tohoto priestorového pohľadu?

### 2.1 Kalibrácia projektor-kamera

Projektor a kamera sú rôzne umiestnené zariadenia, ktoré majú iné rozlíšenia a zorné polia. Ukážku je možné vidieť na obrázku 7. Na to, aby projektor vedel, kam má premietiť, je potrebné ujednotiť pohľad kamery a projektor - nájsť zobrazenie z trojrozmerných súradníc kamery do dvojrozmerných súradníc projektor.



Obr. 7: Príklad umiestnenia projektoru a kamery.

Hľadané zobrazenie sa skladá z dvoch častí. Prvá časť je zobrazenie, ktoré prevedie 3D body v súradniciach kamery do 3D bodov v súradniciach projektora (vysporiada sa s posunutím, škálovaním a rotáciou). Je popísaná rovnicou 1, kde  $[x_c, y_c, z_c]$  je 3D bod v súradniciach kamery,  $[x_{p_0}, y_{p_0}, z_{p_0}]$  je 3D bod v súradniciach projektora a  $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}, t_1, t_2, t_3$  sú neznáme parametre zobrazenia.

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{p_0} \\ y_{p_0} \\ z_{p_0} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Druhá časť je perspektívna projekcia, ktorá premietne 3D body v súradniciach projektora do 2D bodov v súradniciach projektora (vysporiada sa s prevodom jednotiek a zmenou pomeru strán). Je popísaná rovnicami 2, kde  $[x_p, y_p]$  je 2D bod v súradniciach projektora,  $[x_{p_0}, y_{p_0}, z_{p_0}]$  je 3D bod v súradniciach projektora a  $c_1, c_2$  sú neznáme parametre.

$$x_p = \frac{c_1 x_{p_0}}{z_{p_0}}, \quad y_p = \frac{c_2 y_{p_0}}{z_{p_0}} \quad (2)$$

V prvej časti je 12 a v druhej 2 neznáme parametre, spolu 14 neznámych parametrov, ktoré potrebujeme odhadnúť. Na odhad týchto parametrov potrebujeme získať dostatočné množstvo korešpondujúcich párov bodov pozostávajúcich z 2D bodu v súradniciach projektora a 3D bodu v súradniciach kamery. Teraz popíšeme spôsob odhadu parametrov prebratý z práce [11].

Z rovnice 1 vyjadríme  $x_{p_0}, y_{p_0}$  a  $z_{p_0}$  a dosadíme do rovníc 2 a dostaneme:

$$x_p = \frac{c_1(r_{11}x_c + r_{12}y_c + r_{13}z_c + t_1)}{r_{31}x_c + r_{32}y_c + r_{33}z_c + t_3}, \quad y_p = \frac{c_2(r_{21}x_c + r_{22}y_c + r_{23}z_c + t_2)}{r_{31}x_c + r_{32}y_c + r_{33}z_c + t_3}. \quad (3)$$

Substitúciou  $q_1 = \frac{c_1 r_{11}}{t_3}, q_2 = \frac{c_1 r_{12}}{t_3}, \dots, q_{11} = \frac{r_{33}}{t_3}$  znížime počet parametrov na 11 a po dosadení do 3 dostaneme:

$$x_p = \frac{q_1 x_c + q_2 y_c + q_3 z_c + q_4}{q_9 x_c + q_{10} y_c + q_{11} z_c + 1}, \quad y_p = \frac{q_5 x_c + q_6 y_c + q_7 z_c + q_8}{q_9 x_c + q_{10} y_c + q_{11} z_c + 1}. \quad (4)$$

Upravíme tak, aby na jednej strane boli neznáme a na druhej zvyšok:

$$\begin{aligned} q_1 x_c + q_2 y_c + q_3 z_c + q_4 - q_9 x_c x_p - q_{10} y_c x_p - q_{11} z_c x_p &= x_p, \\ q_5 x_c + q_6 y_c + q_7 z_c + q_8 - q_9 x_c y_p - q_{10} y_c y_p - q_{11} z_c y_p &= y_p. \end{aligned} \quad (5)$$

Z rovníc 5 získaeme maticu v tvare  $AX = Y$ :

$$\begin{pmatrix} x_{c_1} & y_{c_1} & z_{c_1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{c_1}x_{p_1} & -y_{c_1}x_{p_1} & -z_{c_1}x_{p_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{c_1} & y_{c_1} & z_{c_1} & 1 & -x_{c_1}x_{p_1} & -y_{c_1}x_{p_1} & -z_{c_1}x_{p_1} \\ x_{c_2} & y_{c_2} & z_{c_2} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{c_2}x_{p_2} & -y_{c_2}x_{p_2} & -z_{c_2}x_{p_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_2 & y_{c_2} & z_{c_2} & 1 & -x_{c_2}x_{p_2} & -y_{c_2}x_{p_2} & -z_{c_2}x_{p_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_n & y_{c_n} & z_{c_n} & 1 & -x_{c_n}x_{p_n} & -y_{c_n}x_{p_n} & -z_{c_n}x_{p_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \\ q_8 \\ q_9 \\ q_{10} \\ q_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{p_1} \\ y_{p_1} \\ x_{p_2} \\ y_{p_2} \\ \vdots \\ y_{p_n} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

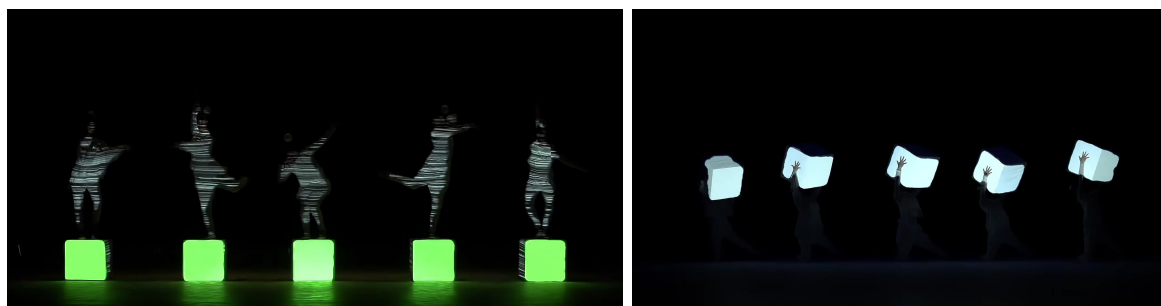
Získali sme sústavu  $2n$  lineárnych rovníc, kde  $n$  je počet korešpondujúcich párov bodov. Máme 11 neznámych, preto potrebujeme aspoň 6 párov bodov na odhad zobrazenia. Sústavu je možné riešiť QR rozkladom, ktorý nájde riešenie pomocou metódy najmenších štvorcov. Hľadané zobrazenie získame dosadením vypočítaných neznámych do rovností 4.

## 3 Existujúce exponáty

V nasledujúcich sekciách uvedieme niekoľko príkladov exponátov využívajúcich rozšírenú realitu s použitím sústavy projektor-kamera.

### 3.1 Dance + Projection Mapping

V roku 2013 sa v Tokyu uskutočnil medzinárodný festival modernej hudby a nových umení Sonar. Bola na ňom predvedená ukážka vizuálneho experimentu Dance + Projection Mapping [10] zobrazená na obrázku 8. V ukážke boli premietané rôzne textúry na piatich hercov (tanečníkov) s kockami.

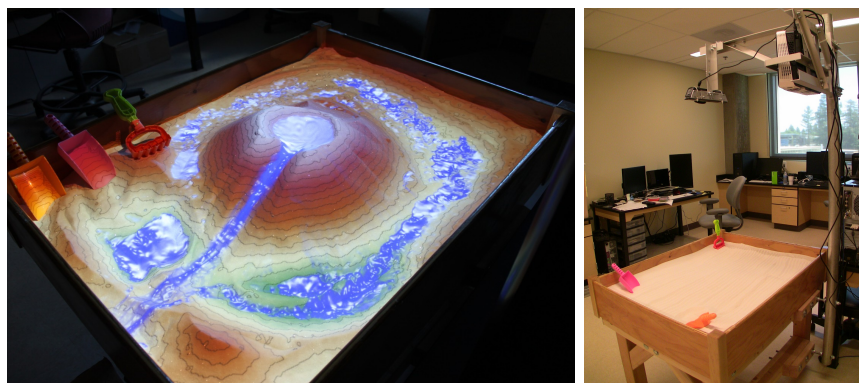


Obr. 8: Ukážka projekcie textúr na tanecníkov s kockami. Zdroj: [10].

### 3.2 Interaktívne pieskovisko

Populárny exponát vedeckých centier je interaktívne pieskovisko [23]. Je to exponát, ktorý pomocou kamery určuje výšku piesku a na základe nej projektor premieta na piesok simuláciu vegetácie, vrstevníc, vody a iné. Ukážku interaktívneho pieskoviska je možné vidieť na obrázku 9.





Obr. 9: Vľavo ukážka interaktívneho pieskoviska. Vpravo stojan pieskoviska, na ktorom je umiestnená hĺbková kamera Kinect a projektor. Zdroj: [13].

### 3.3 Vykýře Play

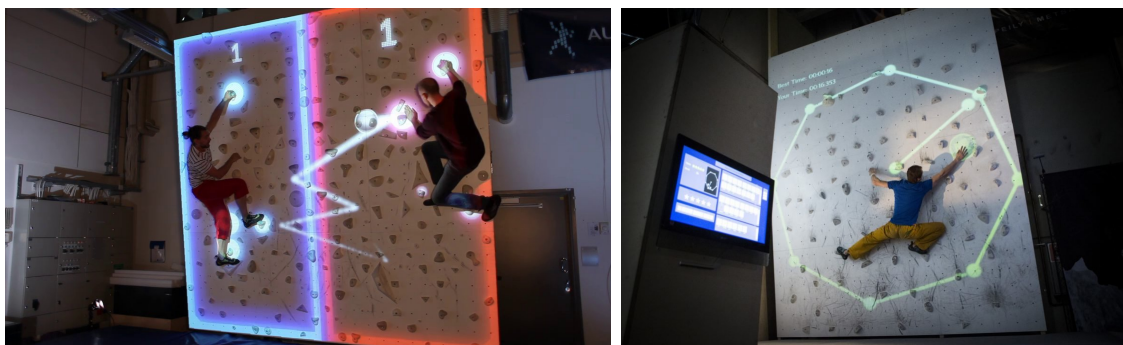
Na výstave Orbis Pictus Play sa objavila v roku 2013 interaktívna expozícia Vykýře Play [1]. Na tejto expozícii bola umiestnená natiahnutá plachta, ktorú osvetľoval projektor a snímala ju kamera. Ak ľudia pritlačili rukou na plátno, projektor ho osvetľoval v mieste pritlačenia. Ukážku expozície je možné vidieť na obrázku 10.



Obr. 10: Ukážka expozície Vykýře Play. Zdroj: [1].

### 3.4 Augumeted Climbing Wall

Ďalším príkladom interaktívneho exponátu je Augumeted Climbing Wall [4] (Interaktívna lezecká stena). V prípade tohoto exponátu kamera sleduje lezca alebo skupinu lezcov a projektor im premieta rôzne prekážky (steny, príšerky, elektrické drôty, ...) alebo si môžu zahrať interaktívnu hru napríklad ping-pong. Tento exponát sa umiestňuje do lezeckých centier, kde sa používa na zábavné a tréningové účely. Ukážku je možné vidieť na obrázku 11.



Obr. 11: Ukážka Augumeted Climbing Wall. Zdroj: [4].

## 4 Návrh a implementácia kalibrácie sústavy projektor-kamera

Pre vytvorenie vlastných interaktívnych exponátov s využitím sústavy projektor-kamera potrebujeme najprv implementovať kalibráciu. V nasledujúcich sekciách popíšeme vlastnú implementáciu. Predtým ešte predstavíme použitý hardware a software.

### 4.1 Použitý hardware a software

Práca bola vypracovaná na notebooku Asus Zenbook UX305FA (Intel Core M 5Y10, 8GB RAM). Mali sme k dispozícii 2 projektory (Optoma X341 a „short throw“ BenQ MX613ST) a 2 kamery (Microsoft Kinect for Windows a Microsoft Kinect for Windows v2).

**Microsoft Kinect for Windows** získava v reálnom čase nasledujúce dáta:

- 32-bitový farebný obraz v rozlíšení 640x480, 30 snímok za sekundu,
- 16-bitovú hĺbkovú mapu v rozlíšení 320x240, 30 snímok za sekundu, hodnoty hĺbky sú v milimetroch,
- zvuk z poľa 4 mikrofónov,
- deteguje najviac 6 postav, vrátane 2 aktívnych hráčov s kostrami (20 kĺbov).

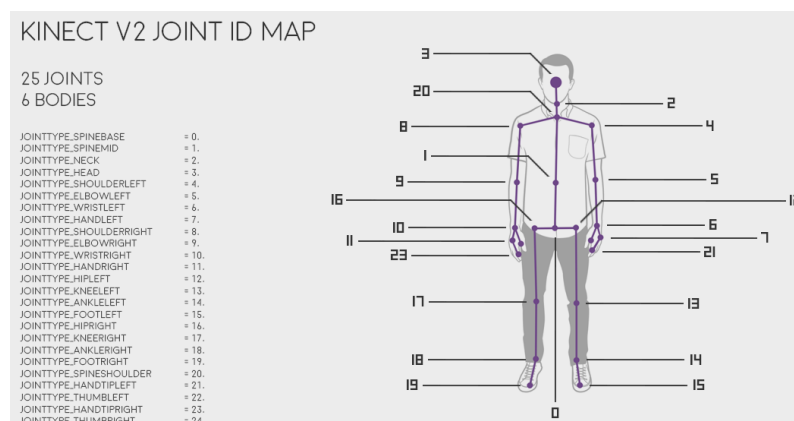
Hĺbkový senzor využíva odrazivosť štruktúrovaného svetla v infračervenej oblasti. Jeho rozsah je 0,8 až 4 metre.

**Microsoft Kinect for Windows v2** získava v reálnom čase nasledujúce dáta:

- 32-bitový farebný obraz v rozlíšení 1920x1080, 30 snímok za sekundu,
- 16-bitovú hĺbkovú mapu v rozlíšení 512x424, 30 snímok za sekundu, hodnoty hĺbky sú v milimetroch,

- 16-bitový infračervený obraz v rozlíšení 512x424, 30 snímok za sekundu,
- zvuk z poľa 4 mikrofónov,
- kostry najviac 6 postáv (25 kĺbov, vyobrazené sú na obr 12).

Hĺbkový senzor pracuje na princípe „Time of flight“. Jeho rozsah je 0,5 až 4 metre.



Obr. 12: Mapa kĺbov kamery Microsoft Kinect for Windows v2. Zdroj: [30].

Na ovládanie kamier sme použili Kinect for Windows SDK v1.8 (Microsoft Kinect for Windows) a Kinect for Windows SDK 2.0 (Microsoft Kinect for Windows v2). Pre výber herného engine, v ktorom budeme implementovať kalibráciu a následne aj exponáty, sme mali 2 možnosti: Unreal engine a Unity engine. Bol zvolený Unity engine z dôvodu, že je jednoduchší a univerzálnejší a autor práce nemal s použitými technológiami žiadne predchádzajúce skúsenosti. Nevýhodou je nutnosť použitia Kinect SDK wrappera, lebo Unity používa .NET Framework 2.0 a Kinect SDK je skompilované pomocou .NET Framework 4.x, ktorý nie je spätne kompatibilný. Wrapper SDK pre Kinect sme získali z Asset Storu Unity [26] a pre Kinect v2 z projektu [18].

Pre prácu s maticami a výpočet neznámych popísaných v kapitole 2 sme použili knižnicu Mapack [24].

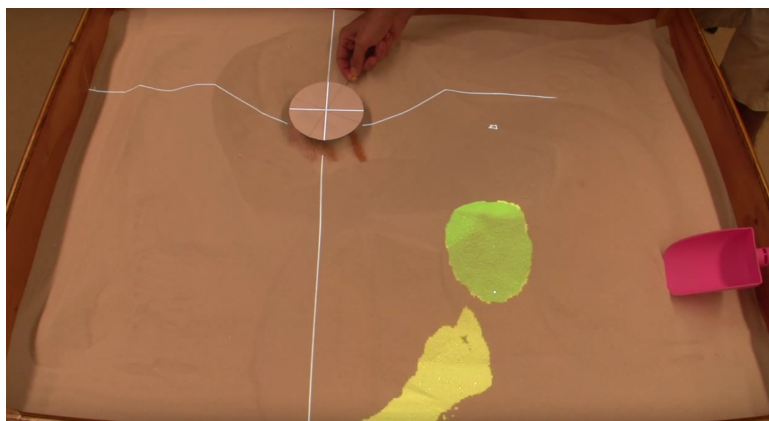
## 4.2 Návrh

Jedným z cieľov práce je vytvoriť nástroj na kalibráciu sústavy projektor-kamera, ktorý je jednoduchý, rýchly, nevyužíva metódy spracovania obrazu a je dostatočne jednoduchý pre používateľa. Najväčším problémom je získanie dostatočného počtu korešpondujúcich párov bodov popísaných v kapitole 2.

V práci [14] popisujú hľadanie až sto párov bodov pomocou osvetlenia náhodného bodu v scéne, jeho následnú detekciu na obraze na rgb kamery a určení jeho vzdialenosti

od kamery. Ich nutnou podmienkou je mať dostatočné množstvo rôzne vzdialených objektov v scéne alebo pohybujúca sa osoba v scéne, aby pokryli celý priestor snímanej scény.

V prácach [23, 28] získavajú páry bodov pomocou svetelného krížika a kruhového telesa. Do scény sa vysvieti svetelný krížik a človek vloží do scény kruhové teleso tak, aby krížik svietil na stred kruhového telesa. Následne sa v scéne deteguje kontúra kruhového telesa. Ukážka je na obrázku 13. Získaný pár sa skladá zo stredu krížika v 2D súradniciach projektora a stredu vloženého kruhového telesa v 3D súradniciach kamery.



Obr. 13: Ukážka získavania páru bodov v práci [23]. Zdroj: [23].

Všetky uvedené riešenia využívajú metódy spracovania obrazu, sú zdĺhavé a potrebujú veľké množstvo bodov pre úspešnú kalibráciu. Navrhli sme spôsob kalibrácie, ktorý spĺňa vyššie uvedené požiadavky.

Z oboch uvedených kamier vieme priamo získať mapu kĺbov postavy, ktorú kamera vidí v scéne - máme k dispozícii 3D pozície kĺbov postavy v scéne. Stačí si vybrať ľubovoľný kĺb postavy v scéne a zobrať jeho pozíciu v 2D súradniciach projektora aj v 3D súradniciach kamery. Takto získame pár korešpondujúcich bodov. Po získaní dostatočného počtu bodov stačí použiť knižnicu Mapack [24] na vypočítanie neznámych z kapitoly 2.

## 4.3 Implementácia

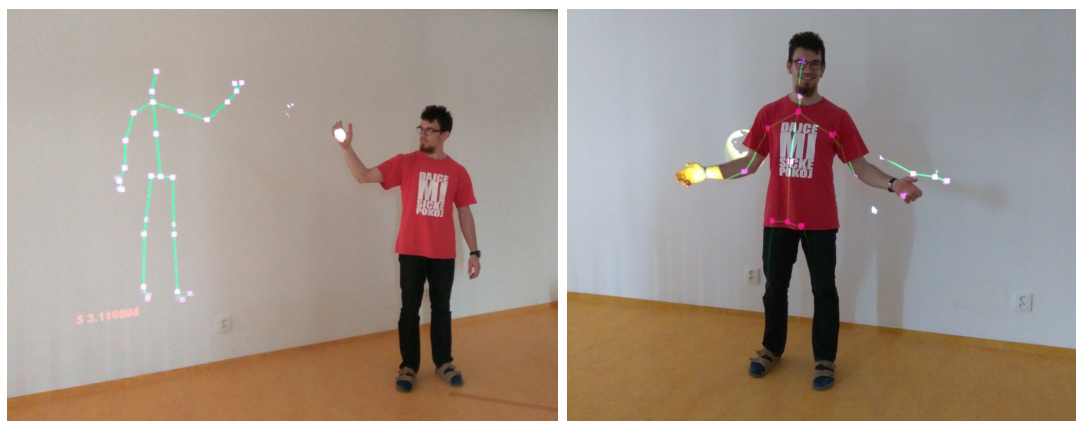
### Microsoft Kinect for Windows

Najprv sme mali k dispozícii len kameru Microsoft Kinect for Windows. S používaním tejto kamery sme mali problém. Wrapper SDK bol napísaný veľmi komplikovane

a síce sa nám podarilo získať kostru jednej postavy v scéne, čo by sme vedeli použiť na kalibráciu sústavy, nedarilo sa nám získať kostry dvoch postáv. Nemožnosť získať kostry dvoch postáv v scéne by bola veľmi obmedzujúca pri následnej tvorbe interaktívnych exponátov. Pre tento problém a preto, že sme neskôr dostali k dispozícii kameru Microsoft Kinect for Windows v2, rozhodli sme sa kalibráciu s pomocou kamery Microsoft Kinect for Windows neimplementovať.

## Microsoft Kinect for Windows v2

V prípade kamery Microsoft Kinect for Windows v2 sme sa so žiadnymi väčšími problémami nestretli a postupovali sme podľa pôvodného návrhu. Ako kalibračný kĺb sme si zvolili pravú dlaň. Dôvodom bolo, že je dobre rozpoznateľný kamerou a sledovaná postava nemá problém umiestniť dlaň na ľubovoľné miesto v scéne. Pri implementácii sme použili prázdnu scénu v Unity, do ktorej sme vložili kostru osoby, pozostávajúcu z kĺbov (kociek) a kostí (čiar prepájajúcich kĺby), ktorú sme získali z Kinectu. Samozrejme, ako je vidno na obrázku 14, sústava projektor-kamera nie je skalibrovaná, preto sa kostra nezobrazuje správne na osobu v scéne. Okrem kostry sme do scény vľavo dole umiestnili text s informáciami o počte získaných kalibračných párov bodov a aktuálnu vzdialenosť kalibračného kĺbu od kamery.



Obr. 14: Ukážka kalibrácie sústavy projektor-kamera. Vľavo je vidno, že sústava nie je skalibrovaná, lebo kostra sa nezobrazuje správne na osobu v scéne. Vpravo je sústava po kalibrácii, kostra sa zobrazuje korektne na postavu v scéne.

Kinect má pre všetky kĺby tri možné stavy: sledovaný, odhadnutý a nesledovaný. Pozíciu kĺbu v 2D súradniciach projektora sme určili kliknutím myšou naňho (kôli presnosti sme na myš premietali bielu guľu - objekt typu sphere) a pozíciu v 3D súradniciach kamery získame priamo z kamery. Ak je kĺb pri kliknutí v stave sledovaný, uložíme získané pozície a zmeníme počet získaných párov v informáciách vľavo

dole. Týmto spôsobom sme získali niekoľko párov korešpondujúcich bodov, tie sme spracovali pomocou knižnice Mapack a získali hľadané zobrazenie.

Sériou pokusov sme zistili, že kalibrácia je dostatočne presná, ak počet získaných dvojíc bodov je približne osem. Ak sme kalibrovali pomocou ôsmich koplanárnych dvojíc bodov, kalibrácia fungovala korektne len v malom okolí roviny, z ktorej body pochádzali. Pri vzdialení sa od roviny smerom ku alebo od kamery dochádzalo k neúmernému zväčšovaniu alebo zmenšovaniu zobrazovanej kostry. Prišli sme na to, že ak ležia 4 dvojice bodov v jednej rovine kolmej na pohľad projektora a ďalšie 4 dvojice bodov v druhej rovine kolmej na pohľad projektora, tak kalibrácia funguje korektne medzi týmito dvoma rovinami. Ukážka skalibrovannej sústavy projektor-kamera je na obrázku 14.

Naše riešenie je rýchle, jednoduché, nevyžaduje veľké množstvo párov bodov, je všeobecnejšie a používateľsky príjemnejšie ako práce [14, 23, 28].

## 5 Návrh a implementácia interaktívnych exponátov

V tejto kapitole popíšeme návrh a implementáciu dvoch interaktívnych exponátov: hry ping-pong a ninja keyboard.

### 5.1 Hra ping-pong

Hra ping-pong je inšpirovaná interaktívnym exponátom Augumeted Climbing Wall, konkrétne obrázkom 11 vľavo. Skladá sa z hracej lopty, virtuálnych stien hore a dole (hracia lopta sa od nich odráža), z rakiet (gulí, premietaných na telá hráčov), ktorými hráciu loptu odrážajú. Hra sa hrá rovnako ako stolný tenis, keď niektorému hráčovi ujde lopta, druhému sa pripíše bod.

#### Návrh

Hru sme navrhli tak, aby ju mohli hrať dvaja hráči stojaci pri akejkoľvek dostatočne veľkej stene. Implementovanú kalibráciu využijeme na skalibrovanie sústavy projektor-kamera. Následne sa dvaja hráči postaví k stene, na ktorú premieta projektor. Medzi nich sa do stredu premietanej plochy zobrazí lopta. Po začatí hry sa náhodne zvolí smer lopty na jedného z hráčov. Hráči ju vedľa odbíjať len raketami (gulami premietanými len na obe dlane hráčov). Pozície dlaní hráčov získame priamo z Kinectu a na základe kalibrácie vieme, kam máme gule vykresliť. Na premietanej ploche sú hore a dole vytvorené imaginárne steny, od ktorých sa lopta odbíja. Ak ľubovoľnému hráčovi ujde lopta mimo obraz projektoru, druhému hráčovi sa pripíše bod a lopta sa opäť umiestni do stredu premietanej plochy a hra môže pokračovať.

#### Implementácia

Pri implementácii sme postupovali podľa predchádzajúceho návrhu. Po úspešnej kalibrácii sa zo scény odstráni kostra osoby a do stredu scény umiestni hracia lopta



(objekt primitívneho typu sphere). Hore a dole sa do scény umiestnia virtuálne steny (objekty primitívneho typu cube). Vpravo a vľavo dole sú v scéne umiestnené texty, ktoré informujú o aktuálnom skóre hráčov. Na obe dlane hráčov sú premietané rakety (objekty primitívneho typu sphere), ktorými odbíjajú hraciu loptu.

Pri testovaní sme narazili na problém: väčšinou obaja hráči stoja počas hry bokom vzhľadom na pohľad kamery, potom kamera nedokáže správne rozpoznať ruku, ktorá je vzdialenejšia, lebo väčšinou je zakrytá telom. Tento problém sme vyriešili tým, že hráč má raketu (guľu), premietanú len na jednu ruku, ktorá je bližšie pri Kinecte. Ukážku z hry ping-pong je možné vidieť na obrázku 15.



Obr. 15: Ukážka hry ping-pong.

Exponát sme testovali na prázdnych stenách s dostatočným priestorom pred ňou (približne 6 metrov) ale aj na lezeckej stene. V oboch prípadoch sme projektor umiestnili približne 5 metrov od steny a Kinect 3,5 metra od steny (kvôli rozsahu Kinectu). V prípade lezeckej steny exponát nefungoval správne. Dôvodom bolo, že pri kontakte ruky so stenou Kinect nedokáže správne detegovať ruku (kvôli presnosti merania hĺbkovej mapy Kinecom), a teda nebolo možné správne vykresľovať rakety na ruky hráčov. Tento problém sa nám v rámci tejto bakalárskej práce nepodarilo odstrániť. V prípade prázdnej steny sme sa stretli vyššie popísaným problémom zakrytia jednej z rúk pri použití oboch rúk. Ten bol úspešne odstránený použitím jednej ruky a exponát tým nijako neutrpel na funkcionalite.

## 5.2 Ninja keyboard

Doteraz sme na interaktivitu využívali sústavu projektor-kamera. Interaktívny exponát ninja keyboard nahradzuje v tejto sústave kameru za klávesnicu, teda používa sústavu projektor-klávesnica. Na implementáciu exponátu sme použili podobný stojan,

aký je na obrázku 9 vpravo, ale použili sme len projektor, ktorý premietal smerom dole na vodorovnú podložku vo výške stola, na ktorej leží klávesnica.

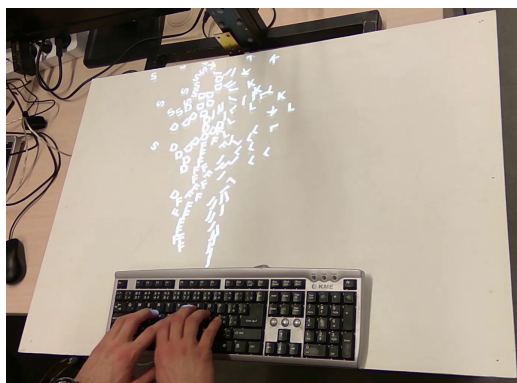
## Návrh

Myšlienkou exponátu je: po stlačení (držaní) ľubovoľného klávesu, kláves vystrelí (vystreľuje) zhora z klávesnice. Samozrejme nie naozaj, ale len za pomoci vykreslenia projektorom. Takto vzniká „fontána“ z vystrelených klávesov, ktoré sa po dopade na vrchol klávesnice kľžu k jej okrajom a odtiaľ padajú dole. Vynechanie kamery je výhodné z pohľadu jednoduchosti sústavy. Problém je určiť, kam má projektor premietiť.

Pozícia vystrelenia klávesu je určená x-ovou súradnicou pozície klávesu a y-ovou súradnicou vrcholu klávesnice. Túto pozíciu nepoznáme, a keďže nemáme kameru, ktorá by ju určila, musíme ju určiť inak. Klikaním na jednotlivé klávesy zľava doprava uložíme ich pozície do poľa, pričom v ľavej hornej časti scény zobrazíme text s informáciami o klávese na ktorý máme kliknúť. Po kliknutí na všetky klávesy sa zobrazí text požadujúci kliknutie na vrchol klávesnice.

## Implementácia

Pri implementácii sme postupovali podľa predchádzajúceho návrhu. Najprv úplne dole do stredu scény (plochy, na ktorú premieta projektor) umiestnime reálnu klávesnicu. Vrch klávesnice v programe tvorí priesvitná striedka (dva priesvitné obdĺžniky - objekty typu sprite), umiestnená v strede scény. Slúži na to, aby klávesy nepadali cez klávesnicu. Spustíme kalibráciu a tým sa zobrazí striedka klávesnice (zmení sa jej farba z priesvitnej na bielu). Šírku striedky vieme upraviť stláčaním kláves ľavý alt + ľavý ctrl + šípka doprava alebo doľava tak, aby bola rovnaká ako šírka klávesnice. Klávesnicu položíme presne pod striedkou a skalibrujeme tak ako je popísané v návrhu. Kliknutím na vrchol klávesnice sa určí y-ová pozícia striedky. Y-ová pozícia vystrelenia klávesu je tesne nad y-ovou pozíciou striedky. Pozícia striedky sa kliknutím nemusí určiť presne, preto je možné ju spresniť stláčaním kláves ľavý alt + ľavý ctrl + šípkami hore alebo dole. Po dokončení kalibrácie sa farba striedky opäť zmení na priesvitnú. Jednotlive vystrelené klávesy sú objekty typu sprite. Ukážku exponátu je na obrázku 16.



Obr. 16: Ukážka interaktívneho exponátu ninja keyboard.

Tento exponát nie je zložitý myšlienkou ani realizáciou, ale jeho výsledný efekt je veľmi pekný.

# Záver

Práca sa zaoberá interaktívnymi exponátmi vo vedeckých centrách, konkrétne exponátmi využívajúcimi rozšírenú realitu s využitím sústavy projektor-kamera. Vysvetľuje pojem reálno-virtuálne kontinuum a jeho časti. Vytvára prehľad existujúcich interaktívnych exponátov využívajúcich rozšírenú realitu s pomocou sústavy projektor-kamera. Podrobne rozoberá sústavu projektor-kamera a matematicky popisuje jej kalibráciu. Po naštudovaní existujúcich riešení bol navrhnutý a implementovaný vlastný spôsob kalibrácie. Testovaním sa ukázalo, že naše riešenie funguje korektne a je všeobecnejšie ako existujúce riešenia. Najväčšou výhodou nášho riešenia je malý počet kalibračných párov bodov (osem párov bodov ležiacich v dvoch rovnobežných rovinách). Aj pri tak malom počte párov bodov je kalibrácia stále dostatočne presná. V práci sú navrhnuté, implementované a otestované dva interaktívne exponáty: ninja keyboard a hra ping-pong, ktorá využíva navrhnutú kalibráciu.

Do budúca je možné:

- odstrániť obmedzenie hry ping-pong (ovládanie hry iba jednou rukou) v podobe ovládania oboma rukami (nohami); žiaľ toto rozšírenie bude fungovať len za predpokladu, že hráč je natočený v smere pohľadu kamery alebo proti smeru pohľadu kamery,
- použitím metód počítačového videnia odstrániť problém s hrou ping-pong na lezeckej stene a implementovať ďalšie interaktívne exponáty využiteľné na lezeckej stene,
- s použitím kalibrácie sústavy projektor-klávesnica implementovať ďalšie interaktívne exponáty, napríklad hru na zlepšenie rýchlosti písania na klávesnici,
- implementovať ďalšie interaktívne exponáty a interagovať aj s inými objektami v scéne, napríklad s loptou (interaktívny basketbalový kôš),
- implementovať interaktívne ovládanie exponátov pomocou gest alebo bezdotykové menu v rozšírenej realite.

# Zoznam použitej literatúry

- [1] 3DSENSE. Vikyre play. Dostupné na internete: <http://3dsense.cz/portfolio/2013-vikyre-play>, 2013. [cit. 24. 03. 2017].
- [2] ASUS. Xtion pro live. Dostupné na internete: <http://augmentedclimbing.com/>, 2013d. [cit. 24. 03. 2017].
- [3] AUGMENT. You can thank augmented reality for pokemon go. Dostupné na internete: <https://blogs.windows.com/devices/2017/02/21/stryker-chooses-microsoft-hololens-bring-operating-room-design-future-3d/#1gtz3jr0t3fXyzYy.97>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].
- [4] AUGMENTED CLIMBING WALL. Augmented climbing wall. Dostupné na internete: <http://augmentedclimbing.com/>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].
- [5] AULIA, M. Lego innovates again with life of george – require devices to play. Dostupné na internete: <https://www.cravingtech.com/lego-innovates-life-george-require-devices-play.html>, 2013. [cit. 24. 03. 2017].
- [6] BARDEEN, L. Stryker chooses microsoft hololens to bring operating room design into the future with 3d. Dostupné na internete: <https://blogs.windows.com/devices/2017/02/21/stryker-chooses-microsoft-hololens-bring-operating-room-design-future-3d/#1gtz3jr0t3fXyzYy.97>, 2017. [cit. 24. 03. 2017].
- [7] CREATIVE. Creative senz3d™. Dostupné na internete: <http://cs.creative.com/p/web-cameras/creative-senz3d>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].
- [8] GAMEPOT. Oculus responds to rift's facebook privacy concerns. Dostupné na internete: <http://www.gamespot.com/articles/oculus-responds-to-rifts-facebook-privacy-concerns/1100-6438599/>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].
- [9] GOOGLE. Cardboard. Dostupné na internete: <https://vr.google.com/cardboard/>, 2014. [cit. 24. 03. 2017].

- [10] HIGA, S., AND MANABE, D. Dance + projection mapping. Dostupné na internete: <http://www.satoruhiga.com/post/55169209362/prostheticknowledge-dance-projection>, 2013. [cit. 24. 03. 2017].
- [11] HRDLIČKA, J., AND WILD, J. Augmented reality for smart homes: Depth camera and projector calibration. *Smart Homes 2013* (2013), 23–25.
- [12] HTC. Vive. Dostupné na internete: <https://www.vive.com/eu/>, 2015. [cit. 24. 03. 2017].
- [13] KREYLOS, O. Augmented reality sandbox. Dostupné na internete: <http://idav.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/SARndbox/>, 2015. [cit. 24. 03. 2017].
- [14] KRUCHŇA, O. Mapování obrazu na lidskou postavu. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2013.
- [15] MICROSOFT. Kinect. Dostupné na internete: <https://support.xbox.com/en-US/xbox-360/accessories/kinect-sensor-components>, 2010. [cit. 24. 03. 2017].
- [16] MICROSOFT. Kinect v2. Dostupné na internete: <http://www.xbox.com/en-US/xbox-one/accessories/kinect>, 2012. [cit. 24. 03. 2017].
- [17] MICROSOFT. Hololens. Dostupné na internete: <https://www.microsoft.com/microsoft-hololens/en-us>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].
- [18] MICROSOFT. Kinect tools and resources. Dostupné na internete: <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect/tools>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].
- [19] MILGRAM, P., TAKEMURA, H., UTSUMI, A., AND KISHINO, F. Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Photonics for industrial applications* (1995), International Society for Optics and Photonics, pp. 282–292.
- [20] MSI. Vr one. Dostupné na internete: <http://vr.msi.com/Backpacks/vrone>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].
- [21] Niantic. Pokémon go. Dostupné na internete: <http://www.pokemongo.com/>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].
- [22] OCULUS. Rift. Dostupné na internete: <https://www.oculus.com/rift/>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].

- [23] REED, S., KREYLOS, O., HSI, S., KELLOGG, L., SCHLADOW, G., YIKILMAZ, M., SEGALE, H., SILVERMAN, J., YALOWITZ, S., AND SATO, E. Shaping watersheds exhibit: An interactive, augmented reality sandbox for advancing earth science education. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (2014), vol. 1, p. 01.
- [24] ROEDER, L. Mapack. Dostupné na internete: <https://github.com/lutzroeder/Mapack>, 2017. [cit. 24. 03. 2017].
- [25] SAMSUNG, AND OCULUS. Gear vr. Dostupné na internete: <http://www.samsung.com/global/galaxy/gear-vr/>, 2015. [cit. 24. 03. 2017].
- [26] SOLUTIONS, R. Kinect with ms-sdk. Dostupné na internete: <https://www.assetstore.unity3d.com/en/#!/content/7747>, 2013. [cit. 24. 03. 2017].
- [27] SONY. Playstation vr. Dostupné na internete: <https://www.playstation.com/en-us/explore/playstation-vr/>, 2016. [cit. 24. 03. 2017].
- [28] TOMORI, Z., VANKO, P., AND VAITOVIC, B. Using of low-cost 3d cameras to control interactive exhibits in science centre. In *Emergent Trends in Robotics and Intelligent Systems*. Springer, 2015, pp. 273–281.
- [29] TV MARKÍZA. Aké počasie nás ešte čaká tento týždeň? Dostupné na internete: [http://www.tvnoviny.sk/domace/1689569\\_ake-pocasie-nas-este-caka-tento-tyzden](http://www.tvnoviny.sk/domace/1689569_ake-pocasie-nas-este-caka-tento-tyzden), 2013. [cit. 24. 03. 2017].
- [30] vvvv. Kinect v2 joint id map. Dostupné na internete: <https://vvvv.org/sites/default/files/imagecache/large/images/kinectskeleton-map2.png>, 2012. [cit. 24. 03. 2017].

# Prílohy

**Príloha A:** CD médium - bakalárska práca v elektronickej podobe, zdrojové kódy a používateľská príručka k hre ping-pong a exponátu ninja keyboard.