

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Eljárások, csomagok és alkalmazások a
Mental Cutting Test feladatainak fejlesztéséhez
és használatához**

Tóth Róbert

Témavezető: Dr. Zichar Marianna



DEBRECENI EGYETEM
Informatikai Tudományok Doktori Iskola
Debrecen, 2023

Tartalom

1. Bevezetés és motiváció	2
1.1. Háttér	2
1.2. A kutatásunk	4
2. Az értekezés új tudományos eredményei és tézisei	7
2.1. MCT scenáriók tervezése Blenderben	7
2.2. MCT scenáriók permutálása Blenderrel	11
2.3. MCT assetek utófeldolgozása	16
2.4. MCT scenáriók GLB assetjeinek kódolása	20
2.5. Az MCT adathalmaz használata	26
3. Irodalomjegyzék	29
4. Releváns publikációk listája	34

1. Bevezetés és motiváció

1.1. Háttér

A térbeli készségek, különösen a térlátási képesség, a vizuális térbeli észlelés, a térbeli vizualizáció és a tájékozódás, továbbá a gondolatbeli hajtogatás (*mental folding*), gondolatbeli vágás (*mental cutting*) és a gondolatbeli forgatás (*mental rotation*) egyaránt fontos szerepet töltenek be a mindennapokban, valamint az összetett matematikai problémák megoldásában és mérnöki tervezésben is (lásd például: Bohlmann és Benölken, 2020; Bishop, 1980; Tosto és tsai., 2014; Cole és tsai., 2021; Zimmermann, Cunningham és America. Committee on Computers in Mathematics Education, 1991; Raju, S. Sorby és Reid, 2022; S. A. Sorby, 2009). A térbeli képességek fejlesztése kihívásokkal teli feladat a STEM területein, mely változatos eszközöket igényel a különféle pedagógiai szituációkban: többek között papíralapú rajzokat, valódi térbeli modelleket és szoftvereket (Presmeg, 2020; Presmeg, 2008; Gerber, 2020). Az elsődleges cél megtalálni ezen eszközök optimális és hatékony kombinációját, többek között virtuális valóság (*virtual reality*) és kiterjesztett valóság (*augmented reality*) alkalmazások formájában. Ezen technológiák már egyaránt sikeresnek bizonyultak a térbeli képességek és egyéb kompetenciák hatékony fejlesztésében (Alpiste Penalba, Torner Ribé és Brigos Hermida, 2019; Huerta és tsai., 2019; Estapa és Nadolny, 2015; Chen, 2019; Cerro Velázquez és Morales Méndez, 2021; Petrov és Atanasova, 2020; Flores-Bascuñana, Diago, Villena-Taranilla és Yáñez, 2020; Suselo, Wünsche és Luxton-Reilly, 2021). A témakörrel nemrég rendszerszintű áttekintést adott Papakostas, Troussas, Krouska és Sgouropoulou, 2021. Összességében jelentős a kereslet a fejlődő technológiákra, melyek a klasszikus tesztek elektronikus változatait kínálva segíthetik a térbeli képességek fejlesztését és értékelését.

Ennek megfelelően számos kutató kezdett az utóbbi évtized-

ben a VR-ral foglalkozni, valamint olyan alkalmazásokat tervezni, amelyek a VR funkciók használatával fejlesztik a felhasználók térbeli képességeit (Rizzo és tsai., 1998; Lochhead, Hedley, Çöltekin és Fisher, 2022; Hartman és tsai., 2006). Ez a megközelítés hatékonynak bizonyult és a használók jobb eredményeket értek el, mint azon társaik, akik csak a papíralapú feladatokat használták (Safadel és White, 2020). Ugyanakkor a VR kezdeti népszerűsége és a felhasználók motiváltsága lankadni kezdett. Az elsődleges okok egyértelműek. Először is a VR használata befektetést igényel, hiszen meg kell vásárolni a speciális szemüveget és a hozzá tartozó hardvereket. Ez azt is jelenti, hogy a hallgatók is saját eszközt kell, hogy vásároljanak a feladatokban történő részvételhez, vagy pedig az egyetemnek és a kutatóknak kell, hogy biztosítsák az elegendő mennyiségű eszközt. A gyártók különféle műanyag- és papíralapú kereteket kezdtek el fejleszteni, melyekbe mobiltelefon helyezhető, így imitálva egy VR szemüveg funkcióit. Ez a megoldás egy kevésbé drága, de gyengébb minőségű megoldást nyújt a környezet kialakítására. Másfelől a VR szemüveg használata gyakran okoz diszkomfortot, számos felhasználó képtelen azt viselni vagy pedig rövid használat után rosszul lesz (Saredakis és tsai., 2020; Chang, Kim és Yoo, 2020).

Számos eltérő, most már standard teszt létezik a térbeli képességek mérésére. Ezek egyike az úgynevezett Mental Cutting Test (MCT), amely eredetileg az amerikai főiskolai felvételi vizsga része volt (CEEB, 1939). Léteznek ugyan újabb, módosított változatai is a tesztnek (Quaiser-Pohl, 2003; Cohen és Hegarty, 2012), de még mindig a klasszikus teszt a leggyakrabban alkalmazott módszer a térbeli képességek mérésére, hiszen a feladat formája mindegyik változatban megegyezik. Egy MCT feladvány (más szóval szcenárió) egy 3D test és egy azt metsző sík 2D-s vetítését tartalmazza. A feladat egyszerűnek tűnik: ki kell választani a 3D test a metsző síkkal történő képzeletbeli vágása során keletkező metszet alakját az öt válaszlehetőség közül. Azonban a szcená-

riók különböző nehézségi szintűek lehetnek. Korábbi kutatások megmutatták, hogy a feladat nehézsége erősen függ az alakzattól és a válaszlehetőségek hasonlóságától (Németh, Sörös és Miklós Hoffmann, 2007; Nagy-Kondor és Esmailnia, 2021). Amennyiben az alternatívák könnyen észlelhető különbségeket tartalmaznak, úgy a scenárió könnyebbnek bizonyul; azonban ha a változatok nagyon hasonló tulajdonságokat tartalmaznak és csak apró részletekben különböznek, akkor a feladat nehéznek bizonyul.

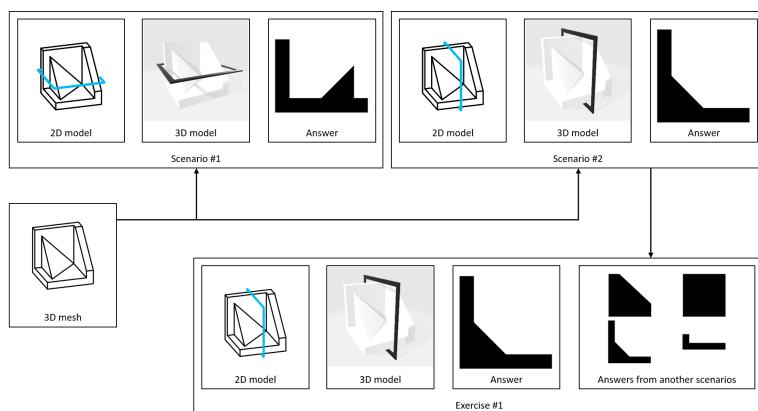
Az utóbbi évtizedekben a legtöbb kutató és oktató egy jól ismert feladatlapot használt, mely 25 scenáriót tartalmaz különféle testek és metsző síkok formájában (lásd 2.1. ábra). A feladat-sor különféle nehézségi szintű feladatokat a változatosan permutált lehetséges válaszokkal biztosítja (Gorska, Sheryl Sorby és Leopold, 1998; Németh és Hoffmann, 2006). Ugyanakkor az elérhető scenáriók alacsony száma nagyban korlátozza a hatékony gyakorlást és a képességek fejlesztését az oktatásban.

1.2. A kutatásunk

A kutatásunkat 2019-ben kezdtük. Az eredeti célunk egy olyan játékosított mobilalkalmazás fejlesztése volt, amely MCT feladatokat kínál a felhasználói számára. A gyakorlás során segítséget nyújtandó, egy AR-alapú megjelenítőt implementáltunk, mely lehetővé teszi a felhasználók számára azt, hogy ellenőrizzék a feladathoz tartozó scenáriót 3D-ben, a 2D-be váltás okozta információvesztés nélkül. Bevezettük a felhasználók megnyerése és motiválása céljából a legnépszerűbb játékosított elemeket. Terveztük ezen kívül egy VR eszköz fejlesztését is, mely egy újabb lehetőség lett volna a feladatok megjelenítésre. Ezen időszak alatt készült el a *viSkillz Play* pilot alkalmazás.

A Blendert használva egy olyan sémát alkottunk meg (lásd 1.1. ábra), mely lehetővé teszi feladatok összeállítását az egyenként előállított assetekből. A sémában az oktatók modelleket terveznek és előállítják a feladathoz nélkülözhetetlen asseteket: a

szcenárió 2D képét (ami a testet és a metsző síkot reprezentáló keretet tartalmazza), valamint öt metszetet, amelyek lehetséges válaszként szolgálnak. Az eredeti MCT feladatok formátumát követve, az utóbbi halmaz egyetlen alakzata helyes válasz, a másik négy pedig helytelen, rossz válasz. Rájöttünk, hogy egy feladatot úgy a legkönnyebb összeállítani, ha a helytelen válaszokat más szcenáriókhöz tartozó metszetek közül válogatjuk. A klasszikus, 2D-s feladatot továbbfejlesztendő, a szcenáriók 2D-s vetülete mellett azok 3D-s modelljeit is előállítottuk.



1.1. ábra. Az MCT feladatok összeállítására alkotott sémánk, melynek inputja több szcenárió.

Ugyanakkor hamar realizáltuk azt, hogy az eredeti vízióink nem megvalósítható anélkül, hogy az MCT feladatokkal kapcsolatos több, jelentős problémára megoldást ne találjunk: nem volt közismert adatbázis, amely permutált feladatot tartalmazna; nem volt közismert módszer a feladatok generálására; valamint nincs bizonyított módszer a feladatok adaptív összeállítására. Mindezek mellett bebizonyosodott, hogy az assetek manuális előállítása nagy erőfeszítést igényel az oktatók részéről, éppen ezért egy hatékonyabb módszer szükséges a lépések elvégzésére.

Újabb kutatási célokon kezdtünk el dolgozni annak érdekében, hogy az MCT feladatok fejlesztését és használatát támogathassuk. Elsőként több, mint 200 modellt és 19 metsző síkot készítettünk Blenderben. Második lépésként egy szkript-alapú eljárást építettünk a Blender Python API-jára, amely a legtöbb lépést automatizálja. Végül pedig előállítottuk az adathalmaz első változatát, hogy megvizsgálhassuk az asseteket, a lehetséges permutációs tényezőket, a gyakori anomáliákat, valamint az eljárás korlátait.

Párhuzamosan azt is realizáltuk, hogy egy mobilalkalmazás nem a legjobb eszköz a hallgatók térbeli képességeinek fejlesztésére, hiszen az intézmények tabletekkel vagy mobiltelefonokkal kell, hogy rendelkezzenek. Hasonlóan, egyetlen VR szemüveg használata sem elégséges egy osztályban. Párhuzamosan pedig a Samsung leállította a Galaxy VR technológia támogatását, a VR népszerűségvesztését előjelezve. Ezért a feladatkészítés technikai hátterére kezdtünk el fókuszálni, miközben az alkalmazásfejlesztéseket webes platformra tereltük. Ezalatt megoldást találtunk a Blender számítási pontatlanságaira és kiterjesztettük a szkript-alapú eljárásunkat további metsző síkokkal és permutációs tényezőkkel. A *viSkillz Browser* és a *viSkillz Quiz* alkalmazások fejlesztésével egy újabb problémába ütköztünk: az adathalmaz túl nagy méretű; éppen ezért az alkalmazások csak egy részét tudták használni. A következő fázisban egy többszintű kódolási sémát terveztünk a 3D assetek tárolására, megoldva a felmerült problémákat. Eközben közzétettük a *viSkillz Browser* és a *viSkillz Quiz* alkalmazásokat a kódolás tesztelésére. Végül pedig egy mérést szerveztünk a karunkon azért, hogy tapasztalatot gyűjtsünk a webalapú 3D nézegetőről és teszteljük azt, hogy miképp befolyásolja a hallgatók eredményeit az eltérő előismeretük a térbeli tesztekkel és 3D játékokkal kapcsolatban.

2. Az értekezés új tudományos eredményei és tézisei

2.1. MCT szcenáriók tervezése Blenderben

1. tézis

205 testet és 31 metsző síkot terveztünk Blenderben. A testeket a klasszikus Mental Cutting Test feladatokból származtattuk. Az elkészített modellek elemezhetőek és a feladatok assetjeit előállítható szkript fejleszthető a segítségükkel.

Folyóiratcikkek:

- R. Tóth, 2021
- R. Tóth, B. Tóth, Miklós Hoffmann és Zichar, 2023

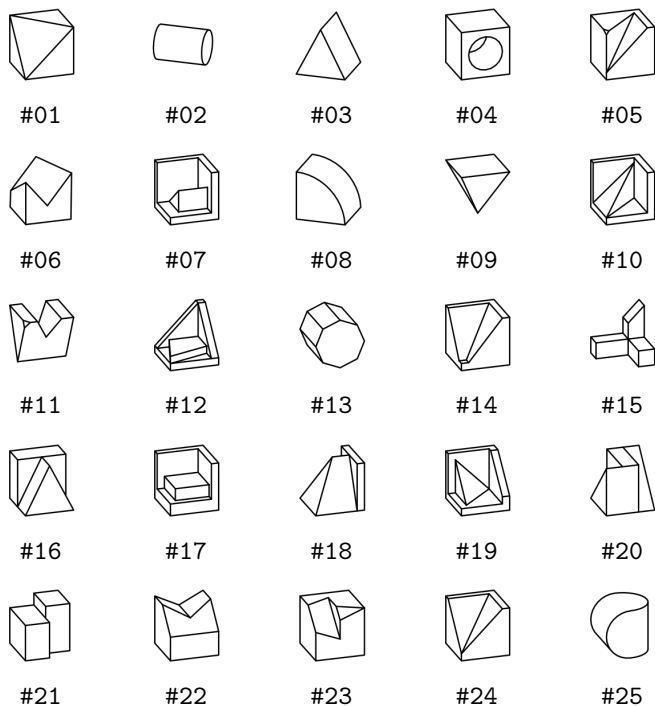
A kutatásunk első lépéseként a 25 klasszikus testet (lásd 2.1. ábra) modelleztük. A célunk az eredeti képek minél pontosabb rekonstruálása volt, miközben a renderelési és feldolgozási anomáliák elkerülése miatt néhány jellemzőt körültekintően kellett megválasztanunk. Másfelől a feladatlap ábrái könnyen észrevehető hibákat is tartalmaznak, hiszen a dokumentum gyenge minőségű, mely a többszörös nyomtatásnak és scannelésnek tudható be. Például néhány esetben a vonalak nem párhuzamosak, továbbá eltérő tulajdonságokat fedezhetünk fel a modellek és a metszeteik között is.

Minden test legfeljebb 2.0 kiterjedésű lehet mindegyik dimenzióban, míg legalább egy dimenzióban pontosan 2.0 kiterjedésű. Így tudjuk ugyanis garantálni azt, hogy a testek méretei konzisztensek legyenek, a későbbi feldolgozást könnyebbé és determinisztikussá téve ezzel. A középpontokat az egyes dimenziók mediánjába helyeztük a forgatási transzformációk érdekében. Né-

hány test esetén apró módosításokat eszközöltünk abból a célból, hogy elkerüljük a metsző síkba eső éleket és csúcsoakat. A feladat-készítőknek el kell kerülniük a felesleges csúcsoak és élek használatát, mivel a legtöbb szcenárió esetében nem szükséges a manuálisan végzett felosztás (*subdivision*).

Ugyanakkor a testek tartalmazhatnak kisebb hibákat, melyek a lebegőpontos számábrázolás hibáiból erednek. A legtöbb modell könnyen megtervezhető a Blender *Boolean* módosítójával, ami képes előállítani két test metszetét, különbségét vagy unióját is. A modellezés folyamata során rendszeresen tapasztaltuk azt, hogy a módosító számítási hibákkal dolgozik. Éppen ezért próbáltuk a *Boolean* módosító használatát elkerülni úgy, hogy a legtöbb csúcsot, éleket és lapot egyszerű alakzatokból származtattuk, atomi műveletek manuális alkalmazásával. Ugyanakkor a Blender számos *Clean Up* műveletet kínál, melyeket mindenképp megéri alkalmaznunk a modelleken: *Delete Loose*, *Degenerate Dissolve*, *Make Planar Faces* és *Split Non-Planar Faces*. Egy fontos további művelet a Blender szerkesztő módjában (*Edit Mode*) a *Triangulate Faces*. Ez az operátor egyenként megvizsgálja az összes lapot, szükség esetén több lapra bontva őket azon célból, hogy a test lapjai csakis háromszögek legyenek. A pontosabb számítások érdekében ez a lépés megkerülhetetlen a modellezés során.

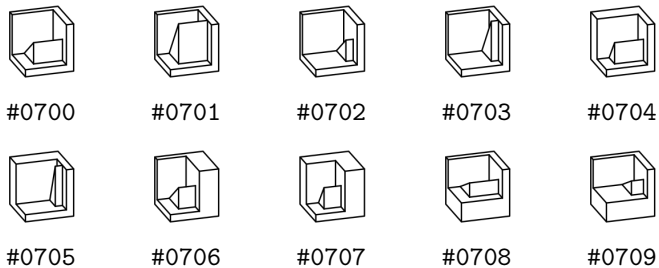
Mindegyik testet ellenőriztük a *Split Non-Planar Faces* operátort használva nem sík lapok után kutatva, 0.5° tűréshatárt alkalmazva. Mindegyik testet addig módosítottuk, amíg az operátor alkalmazása már nem eredményezett módosítást, így garantálva azt, hogy mindegyik lap görbülete tűréshatáron belül legyen. Mindegyik lapot háromszögesítettük a *Triangulate Faces* operátorral (az alapértelmezett paraméterekkel). Végül pedig a *Degenerate Dissolve* és a *Delete Loose* operátorokat alkalmaztuk ebben a sorrendben azért, hogy – néhány, a *Boolean* operátor által okozott kiugró esetet leszámítva – tiszta testeket kapjunk.



2.1. ábra. Reprodukált testek a jól ismert feladatsor alapján (<https://viskillz.inf.unideb.hu/resources/mct-classic.pdf>).

Újabb testeket származtattunk a jól ismert feladatokban szereplőekből annak érdekében, hogy a későbbi lépésekben nagy számú permutálást végezhessünk. Ebben a lépésben egy vagy több fő tulajdonságát változtattuk meg az eredeti testeknek, nagyon hasonló, többnyire csak szimmetriában vagy arányaiban különböző változatokat létrehozva. Másfelől újabb tulajdonságokat is felvettünk, vagy pedig egy-egy meglévőt töröltünk az újabb permutációk előállításakor. Általában kilenc változatot terveztünk minden eredeti testhez (lásd 2.2. ábra). Egy testet a #GGMM karak-

tersorozattal azonosítunk, ahol a GG részszttring a tervezés alapjául szolgáló eredeti test, míg az MM részszttring a permutáció sorszáma. A permutációk egy csoportját a #GG azonosítóval jelöljük, és *test-csoport* vagy *csoport* néven is hivatkozunk.



2.2. ábra. Megváltoztattuk a #07 azonosítójú test főbb tulajdonságait. Ennek eredményeként a legtöbb metsző sík egyedi metszeteket fog előállítani az ugyanazon helyzetű permutációk esetén.

2.2. MCT scenáriók permutálása Blenderrel

2. tézis

Egy szkript-alapú eljárást terveztünk, mely előre definiált permutációs lépéseket és metsző síkokat alkalmaz a manuálisan elkészített testeken annak érdekében, hogy nagyszámú Mental Cutting Test scenáriót állíthassunk elő.

Folyóiratcikkek:

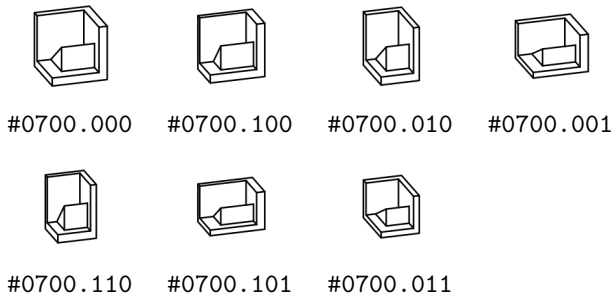
- R. Tóth, 2021
- R. Tóth, B. Tóth, Miklós Hoffmann és Zichar, 2023

Skálázás alkalmazása

A test tulajdonságai – különösen az élek arányai, így a belőle származtatott metszetek arányai – megváltoztathatóak a test egy vagy több globális tengelyen történő skálázásával. Ezért bevezetjük a skálázási vektorok halmazát, melynek elemei a 0.7 és az 1.0 értékek különböző kombinációi (lásd 2.3. ábra). A hét skálázási vektor bevezetése után minden test a #GGMM.SSS formátumú azonosítóval hivatkozható, ahol a GGMM részsstring a test alapjául szolgáló manuális permutációt, míg a SSS részsstring az alkalmazott skálázási vektort azonosítja. Utóbbiban az 1-es számjegy a 0.7-szeres skálázást, míg a 0 számjegy az 1.0-szeres skálázást jelöli.

Forgatás alkalmazása

Valamennyi testből könnyen generálhatunk további permutációkat forgatási transzformációval. Mivel mindegyik testet különféle síkokkal fogjuk metszeni, ezért a test helyzete befolyásolhatja a metszet alakzatát. Jelölje S^{RV} a forgatási vektorok halmazát, egyetlen forgatási vektor ekkor $r = \{X, Y, Z\}$. Az $r \in S^{RV}$ bármelyik komponense a hozzá tartozó globális tengelyen végzett for-

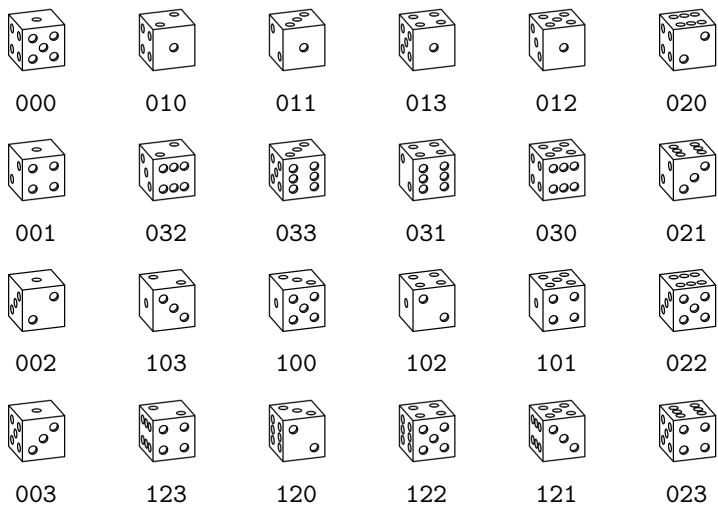


2.3. ábra. A #0700 azonosítójú testből skálázással előállított automatikus permutációk.

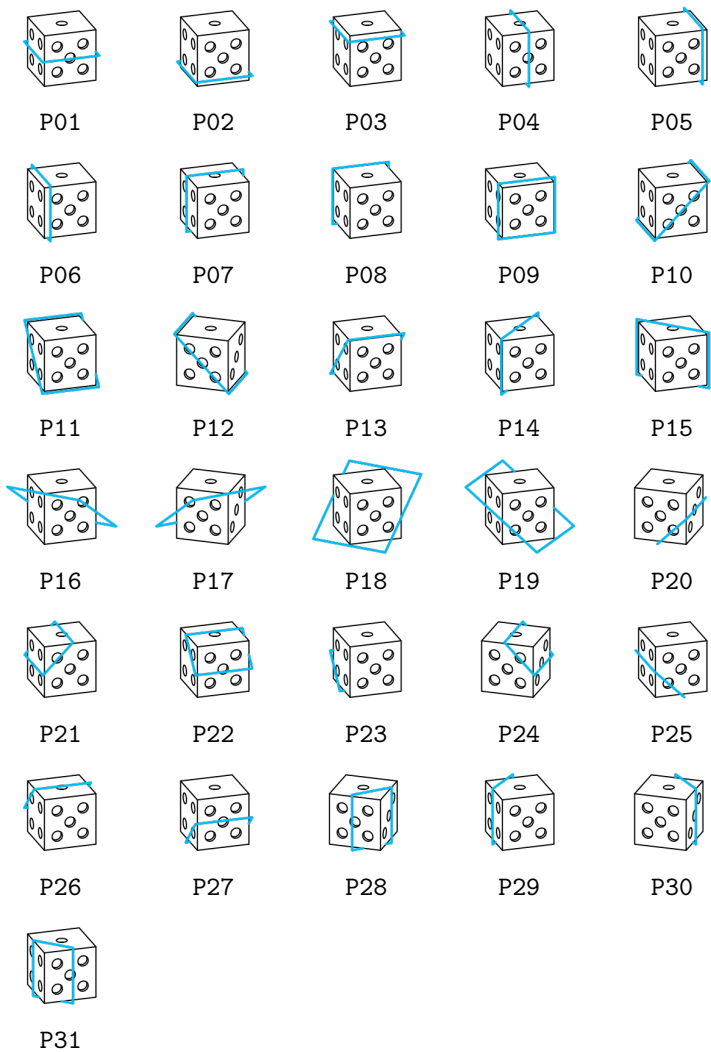
gatás nagyságát írja le. A forgatás nagysága a $\{0, 1, 2, 3\}$ halmaz egy eleme, amely az óramutató irányával ellentétesen végrehajtott, 90° nagyságú forgatások darabszámát jelöli. Az előbbieket alapján egy test helyzete a #GGMM.SSS.RRR formátumú azonosítóval hivatkozható, ahol az RRR részsstring az S^{RV} halmaz egy elemét jelöli (lásd 2.4. ábra).

Metsző síkok

Az iteratív algoritmusunk eredeti változata 19 metsző síkot használt a Blenderben egy-egy pontjuk és a normálvektoruk megadásával. Később 12 további síkot definiáltunk, összesen 31 eleműre növelve a metsző síkok halmazát (lásd 2.5. ábra). Egy valódi feladat esetén ellenőriznünk kell azt, hogy a metsző sík valóban nemüres, könnyen azonosítható alakzatot jelöl-e ki. Ugyanakkor jelen kutatási célunk csak a permutációval foglalkozik, hiszen annyi különböző metszetet szeretnénk előállítani, amennyi csak lehetséges. Így a testek, a skálázások, a forgatások, valamint a metsző síkok valamennyi lehetséges kombinációját figyelembe vesszük a számítások során.



2.4. ábra. Egy dobókocka lehetséges forgatásai. Egy-egy test alatt a forgatáshoz tartozó azonosító látható. 24 különböző forgatási vektor használatával a dobókocka minden lehetséges helyzete előállítható.



2.5. ábra. A 31 darab metsző sík.

Metszetek permutálása

Az előbb említett módszer minden manuálisan permutált test esetén 13888 kombinációt eredményezne, jelentős redundanciával. Másfelől csökkenthetjük a forgatási vektorok és a metsző síkok számát, ugyanis a legtöbb metsző sík elhagyható és egy másik társával helyettesíthető a számítások során. Így lehetőség nyílik valamennyi permutáció előállítására mindössze öt metsző sík, valamint 24 forgatási vektor használatával.

Metszetek meghatározása és exportálása

Az aktuális test, a skálázási vektor, a forgatási vektor és a metsző sík megadása után meg kell határozni a megoldást jelentő metszetet. Dióhéjban, ha a testet metszi a sík, akkor a metszetüket megtisztítjuk és kiterítjük az XY síkra. Az alakzatot az origóba mozgatjuk és skálázzuk. Az eredeti algoritmusban ezen a ponton minden alakzatot kirendereltünk, SVG és PNG reprezentációkat eredményezve. Ugyanakkor szeretnénk a későbbiekben feldolgozni valamennyi él és csúcs koordinátáit. Ezért a renderelés helyett inkább kinyerjük minden él lokális koordinátáit, majd pedig a globális koordináta-rendszerbe konvertáljuk őket. Minden forgatási vektort a Blender XYZ Euler koordináta-rendszerében adunk meg, az előállított koordinátákat pedig JSON dokumentumként exportáljuk.

A 25 eredeti test különböző tulajdonságokkal rendelkezik, ugyanakkor csak négy test kezelése nem egyértelmű, ha a testeket éllel reprezentáljuk (nem pedig görbékkel). Ezért a #02, #04, #06 és #25 azonosítójú testekkel nem foglalkozunk a generálás során.

2.3. MCT assetek utófeldolgozása

3. tézis

Elvégeztük a szkript-alapú eljárás kimeneteként előállított SVG assetek utófeldolgozását és rendellenességeket észleltünk. A manuálisan elvégzett ellenőrzés tapasztalatai alapján megterveztük és implementáltuk a validálás automatizált változatát. Az algoritmus képes a számítási pontatlanságok következtében eltérésekkel rendelkező assetek automatikusan javításra vagy eldobására.

Konferenciacikk: R. Tóth, B. Tóth, Zichar és tsai., 2023a

Valamennyi automatikusan előállított metszetet ellenőriznünk kell, és el kell döntenünk azt, hogy a scenárió ajánlható-e feladványként vagy sem. A validáció koncepcióját a korábban ki-renderelt scenáriók közül véltlenszerűen kiválasztva dolgoztuk ki. Az adathalmaz manuális ellenőrzés alatt a következő rendellenességeket észleltük:

1. **Zajos csúcsok és élek** – Túlságosan rövid élek és hozzájuk tartozó csúcsok észlelhetők sok scenárió esetén. Úgy tapasztaltuk, hogy a megjelenésüknek kétféle oka is lehet.
 - (a) **Valódi élek.** Sok scenárió tartalmaz nagyon rövid éleket, amiket könnyen tekinthetünk zajnak is. Nehéz őket kezelni bármilyen algoritmussal; gyakran a zajként generált élek hosszabbak a metszetek legfinomabb tulajdonságainál. Az iteratív algoritmus során a tesztek és a metsző síkok kombinációi néha nagyon kicsi régiókat vagy tavakat eredményeznek, természetesen a hozzájuk tartozó élekkel együtt. Továbbá a nagyobb régiók kontúrjai is gyakran tartalmaznak rövid éleket hasonló okból.

(b) **Zajként keletkező élek.** Az adathalmazban egy másik minta is észlelhető: a nagyon rövid élek a csomópontoknál jelennek meg, további csúcsokat és éleket adva a reprezentációhoz. A megjelenésük valódi oka ismeretlen a legtöbb esetben, de mindenképp valamilyen számolási pontatlanság következményei: ezért el kell őket távolítani a reprezentációkból. Feltételezésünk szerint a megjelenésük fő oka az IEEE 754 float típus ábrázolási pontatlansága, mellyel a koordinátákat reprezentáljuk. Párhuzamosan ugyanis azt észleltük, hogy a Blender felületén manuálisan begépett literálok is gyakran megváltoznak, kerekítési hibát tartalmazva az 5. vagy a 6. tizedesjegy körül. Ezen felül a testeket tervező oktatók is véhetnek kisebb pontatlansági hibákat.

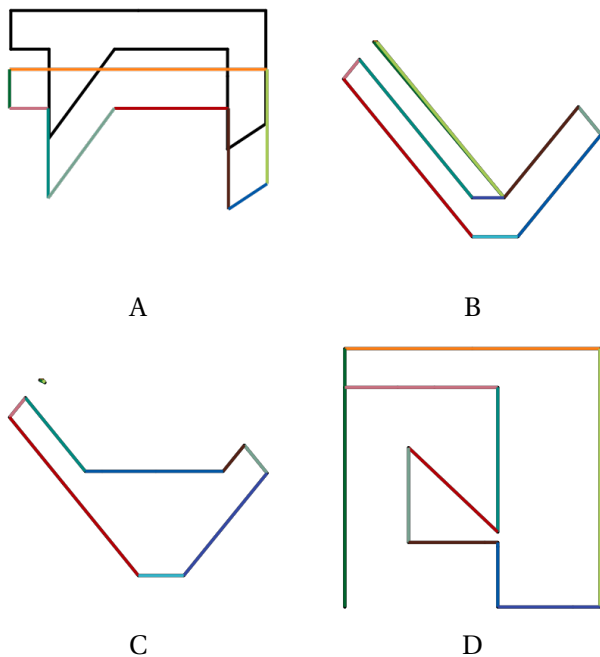
2. **Alakzatok, amik forgács sokszögek (*sliver polygons*)** – A 3D testek és a metsző síkok számos kombinációja nagyon rövid éleket eredményez; az előző pontban foglalkoztunk ezzel az esettel. Ugyanakkor néhány esetben a metszet ezen túl tartalmazhat olyan régiókat vagy részlapokat, amelyek területének és kerületének aránya túl kicsi. Ezekben az esetekben a metsző sík éppen csak érinti a test egyik élét vagy lapját, forgács sokszögeket eredményezve. Ennek következtében több él is átfedheti egymást, abnormális reprezentációt eredményezve.
3. **Felosztott élek** – A háromszögesített lapoknak és a metsző eljárásnak köszönhetően a legtöbb él több, kisebb élre vagy más szóval szegmensre lesz osztva. Mivel ez a metszésnek egy természetes tulajdonsága, ezért szükségessé válik az eredeti reprezentáció előállítására, amelyet összetartozó szegmensek egyetlen élle történő összefésülésével végezhetünk el.

A gyakori hibákat a következő csoportok egyikébe sorolhatjuk a tulajdonságaiknak megfelelően:

1. Hibák, melyek észlelhetőek és javíthatóak; ezután a scenárió-t használhatjuk egy MCT feladatként, vagy a metszetet helytelen válaszlehetőségként.
2. Hibák, melyek a test és a metsző sík helytelen kombinációjából erednek; ezeket a scenáriókat és a metszetüket nem lehet MCT feladatként vagy helytelen válaszlehetőségként felhasználni.

A kidolgozott algoritmus négy lépésből áll, amelyek a manuálisan elvégzett validálás tapasztalatai alapján kerültek meghatározásra:

1. Rövid élék eltávolítása – Eltávolítjuk az összes olyan élt, melyek hossza egy meghatározott küszöbérték alatti. A lehetséges hosszok alsó 1%-át tekintjük így zajnak.
2. Élék vizualizációja – Többféle SVG reprezentációt állítunk elő, melyek az eredeti és a szűrt, középre igazított éleket reprezentálják. Az asseteket rastergrafikus PNG formátummá alakítjuk.
3. Hibák detektálása – Megállapítjuk a rendellenességeket a rastergrafikus képek segítségével (például hogyan fedik le a szűrt és középre igazított élék az eredetieket, mennyi él látható, lásd 2.6 ábra).
4. Hibák megoldása – Egy párkereső algoritmust futtatunk a szűrt élék halmazán és megpróbáljuk helyreállítani valamennyi régió kontúrját azon scenáriók esetében, amelyek ugyan használhatóak, de az eredeti reprezentációjuk volt helytelen.



2.6. ábra. Példák scenáriókra, amelyek reprezentációja rendellenességet tartalmaz. Az eredeti szegmenseket fekete vonalakkal, míg a szűrt és igazított szegmensek színes éllel rajzoltuk. Az *A* és *C* metszetek forgács régiókat tartalmazó scenáriókhoz tartoznak, míg a *B* és *D* metszetek esetén két él fedí majdnem el egymást, ezért az emberek nem tudnák megkülönböztetni őket.

2.4. MCT scenáriók GLB assetjeinek kódolása

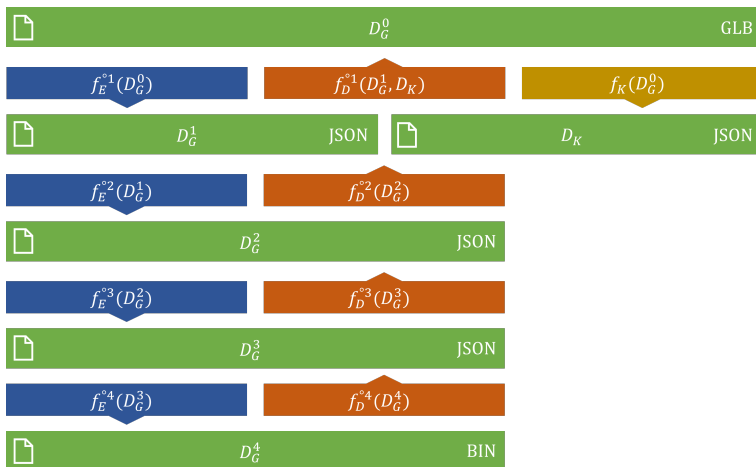
4. tézis

Bevezettünk egy olyan kódolási sémát, mely négy szintből áll és az adathalmaz tárolását támogatja, jelentősen csökkentve annak méretét. A kidolgozott módszer az asettek egy részhalmazát kódolja, amiből képes a teljes adathalmazt visszafejteni a Blender számításaihoz képest 3% idő komplexitással, meghaladva a 10 000-szeres tömörítési arányt és a 99,99%-os helymegtakarítást.

Folyóíratcikk: R. Tóth, Miklós Hoffmann és Zichar, 2023a

A korábbi tézisekben ismertetett adathalmazunk több, mint 1 millió (1 067 640) scenáriót tartalmaz, a tesztek szimmetrikus tulajdonságai miatt némi ismétlődéssel. Csak az AR, VR és 3D megoldásokat támogató GLB modellekre fókuszálva, az asettek 6 521 971 888 bájtot tesznek ki, de több, mint 8 GB tárhelyet foglalnak a Windows 11 operációs rendszer esetén. Ezért az asettek szűrése, valamint a feladatok manuális vagy automatikus összeállítás is egy jelentős méretű adatbázist igényel. Így egy olyan eljárásra mutatkozik igény, mely lehetővé teszi az adathalmaz tömörítését, lehetőségét biztosítva a szerveroldali tárolásra és valós idejű kiszolgálásra. Az egyik lehetséges megoldás valamilyen, már létező tömörítő algoritmus alkalmazása; a GLB asettek esetén a Draco tömörítés¹ egy jól ismert és univerzális eljárás. Ugyanakkor a permutációs algoritmus egyes tényezői felismerhetőek az asettekben. Ennek megfelelően egy domain-specifikus algoritmus jobb tömörítési arányt tesz lehetővé.

¹<https://google.github.io/draco/> (letöltve: 2023. augusztus 13.)



2.7. ábra. A többszintű kódolási séma.

A permutációs tényezőkről rendelkezésre álló háttérinformáció alapján többféle adatformátum tervezhető az assetek lokális és globális tulajdonságainak tárolására. Mi a 2.7. ábrán látható kódolási sémát vezetjük be azért, hogy az adathalmaz méretét az aktuális felhasználásnak leginkább megfelelő, eltérő formátumokban tárolhassuk. A kódoló és dekódoló lépésekből csővezeték építhető; valamennyi kódoló függvény bemenete a felette lévő réteg kimenete, és mindegyik dekódoló függvény bemenete az alatta lévő réteg kimenete. Minden szint rendelkezik egy saját kódoló és dekódoló függvénnyel, melyeket $f_E^{oL}(D^{L-1})$ és $f_D^{oL}(D^L)$ módon hivatkozunk. Az E és a D alsó indexek a kódolást (*encoding*) és a dekódolást (*decoding*) jelölik, míg a felső indexben szereplő oL a függvényhez tartozó szint indexe (ahol $oL = 0$ az eredeti adathalmazt jelöli, a szinteket pedig 1-től 4-ig számozzuk). Így az eredeti asseteket és a kódolt dokumentumokat D_G^L módon jelöljük, ahol az opcionális G felső index egy test-csoport azonosítója. Ezen túl a dokumentumok rendelkezhetnek textúrákkal és lehetnek textúra nélküliek is. A megkülönböztetethez érdekében ezért tovább-

bi T és N betűk szerepeltethetők opcionálisan a felső indexekben, a $D_G^{N^oL}$ és a $D_G^{T^oL}$ jelöléseket eredményezve.

A kulcs dokumentum

Vezessük be az $f_K(D_G^0)$ függvényt, mely az adathalmaz globálisan egyedi jellemzőit nyeri ki, majd pedig egy JSON dokumentumban kódolja azokat. A függvényt az assetek egy bármelyik csoportjával meghívhatjuk, hiszen a kinyert tulajdonságok értékei globálisak. Következésképp, ezt a függvényt egyszer kell meghívni egy adathalmazon, elérhetővé téve a szükséges értékeket valamennyi $f_D^1(D_G^1)$ függvényhíváskor. Ezért az első dekódoló függvény paraméterlistáját ki kell egészítenünk a D_K paraméterrel, az $f_D^1(D_G^1, D_K)$ jelölést eredményezve. A dokumentum mérete 22 958 bájt a textúrázott dokumentumok esetén, és 19 000 bájt a textúrázatlan dokumentumok esetén, indentálás és a tokenek közti szóközök nélkül. Másfelől a dokumentum szerkezetén lehetséges további optimalizálást végezni a tömörebb méret elérése céljából.

Első szint

Az $f_E^1(D_G^0)$ kódoló függvény egy csoport eredeti assetjeit kapja meg paraméterként, majd a D_G^1 JSON dokumentumot adja vissza, minden olyan tulajdonságot tartalmazva, mely az eredeti assetek visszafejtéséhez szükséges a D_K mellett. A bináris rész feldolgozás nélkül, a bufferek eredeti sorrendjében, hexadecimális sztringként kerül tárolásra. A hexadecimális ábrázolást azért választottuk, mert a bináris részben tárolt típusok 2 vagy 4 bájtosak, ezért egy olyan kódolási forma kellett, mely a karakterek különböző hosszú sorozatait bélés (*padding*) nélkül képes ábrázolni.

Az $f_E^1(D_G^0)$ használatával a tárolási méret 99,91%-kal csökkenthető a $D_G^{T^o1}$ adathalmaz esetén, 1 065-szörös tömörítési

arányt elérve a $D_G^{T\circ 0}$ adathalmazhoz képest. Az értékek hasonlóak a textúra nélküli adathalmaz esetén is.

Második szint

Az $f_E^{\circ 2}(D_G^1)$ kódoló függvény a D_G^2 JSON dokumentumot adja vissza. Az új dokumentum megtartja a D_G^1 néhány tulajdonságát, ugyanakkor a bináris rész hexadecimális karaktersorozatainak szétbontásával néhány tulajdonság elhagyható. További tömörítést tudunk elérni, ha a bináris rész valamennyi $s \in B_n$ skálárjára egy $h_n^{\circ 2}(s)$ hash-függvényt alkalmazunk, ahol az n felső index a kódolandó buffer indexét jelöli. A művelet mögött álló kulcsgondolat az, hogy a különböző skalárok darabszáma (így az őket azonosító sorszámok ábrázolása) kevesebb számjegyet igényel, mint a skalárok eredeti, 4 vagy 8 karakter hosszú reprezentációja. Ezért a $h_n^{\circ 2}(x)$ függvény a különböző bufferek indexeit 3, 4, 3 és 1 bájtos egészekkel kódolja, így lehetővé téve a 242, 13 713, 63, és 118 különböző érték hash-elését az indexeik segítségével.

Az $f_E^{\circ 2}(D_G^1)$ használatával a tárolási méret 62,02%-kal csökkenthető a $D_G^{T\circ 2}$ adathalmaz esetén, 2,633-szoros tömörítési arányt elérve a $D_G^{T\circ 1}$ adathalmazhoz hasonlítva, 2 804-szeres arányt elérve pedig a $D_G^{T\circ 0}$ -hoz hasonlítva. Az értékek hasonlóak a textúra nélküli adathalmaz esetén is.

Harmadik szint

Az $f_E^{\circ 3}(D_G^2)$ kódoló függvény a D_G^3 JSON dokumentumot adja vissza. Az $f_E^{\circ 2}(D_G^1)$ függvényhez hasonlóan a kimenet megtartja az előző dokumentum néhány tulajdonságát, ugyanakkor egy második, $h_n^{\circ 3}(x)$ hash-függvényt alkalmaz a bináris részre, ahol az n felső index a kódolandó buffer indexét jelöli. A D_G^2 dokumentumok hexadecimális értékei még mindig jelentős redundanciát tartalmaznak. Ezen tulajdonság oka az, hogy a skalárokat ugyan egyenként hash-eltük már, viszont az első három buffer VEC3, VEC3 és

VEC2 típusú vektorok (ebben a sorrendben). Így nemcsak a skalárok, de a skalárok vektorokat formáló sorozatai is többszörösen fordulnak elő az eredeti karaktersorozatokban. Ezért a sorozatok statisztikai jellemzőit ismét megvizsgáltuk, bizonyítva a vektorok ismétlődő előfordulását. A $h_n^{\circ 3}(x)$ függvény az első három buffert kódolja 2, 4 és 1 bájt hosszúságú kódokkal, melyekkel indexelhetjük a bufferekben található 789, 1 179 és 82 féle különböző vektort.

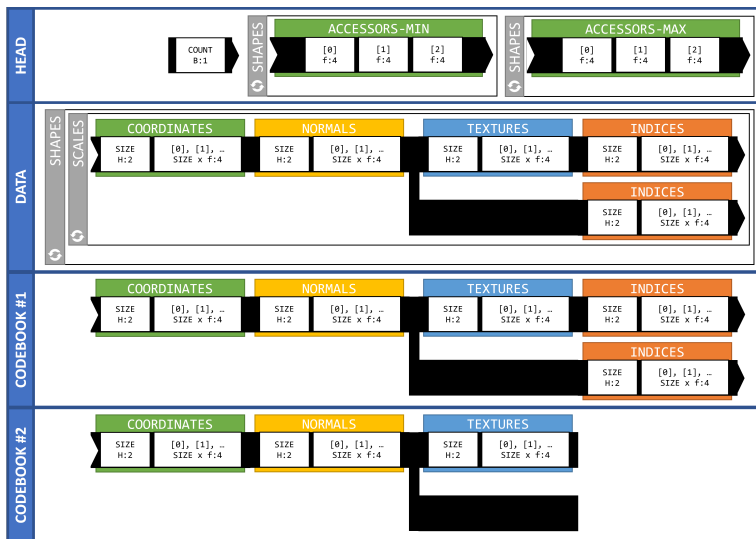
Az $f_E^{\circ 3}(D_G^2)$ használatával a tárolási méret további 37,89%-kal csökkenthető a textúrázott dokumentumok esetén, elérve ezzel az 1,610-szeres tömörítésű arányt a $D_G^{T^{\circ 2}}$ adathalmazhoz hasonlítva, míg a 4 034-szeres tömörítési arányt a $D_G^{T^{\circ 0}}$ adathalmazhoz hasonlítva. Az értékek hasonlóak a textúra nélküli adathalmaz esetén is.

Negyedik szint

Az eddigi kódoló függvények mindegyike egy-egy érvényes JSON dokumentumot állított elő. A JSON dokumentumok pehelysúlyú szintaktikával rendelkeznek, ezért jóval kevesebb töltelékot használnak más jelölőnyelvekhez, például az XML-hez képest. Ugyanakkor az adathalmaz mérete még tovább csökkenthető, amennyiben a szöveges formátumot bináris formátumra cseréljük. Ez a megközelítés a JSON szintaxis valamennyi tokenjét és a tulajdonságok azonosítóit egyaránt eliminálja, továbbá a bináris rész hexadecimális karaktersorozatai is kiválthatóak bájt sorozatokkal. Végül pedig a JSON dokumentumok valós értékei is az IEEE 754 szabvány szerint kódolhatóak a karakterként szereplő számjegyek helyett. Így az $f_E^{\circ 4}(D_G^3)$ függvény a D_G^3 tulajdonságait kódolja, az adathalmaz méretét bináris formátummal csökkentve. A dokumentumok szerkezetét a 2.8. ábra mutatja.

A bináris kódolás használatával a tárolási méret további 53,15%-kal csökkenthető a textúrázott dokumentumok esetén, elérve ezzel a 2,134-szeres tömörítési arányt a $D_G^{T^{\circ 3}}$ adathalmazhoz

hasonlítva, míg a 9 634-szeres tömörítési arányt a $D_G^{T\circ 0}$ adathalmazhoz képest. Az értékek hasonlóak a textúra nélküli adathalmaz esetén is.



2.8. ábra. A $D_G^{T\circ 4}$ és a $D_G^{N\circ 4}$ bináris fájlok szerkezete. A jelöléseket a Python struct moduljából kölcsönöztük.

2.5. Az MCT adathalmaz használata

5. tézis

Alkalmazásokat fejlesztettünk, melyek a saját eljárásainkkal előállított, utófeldolgozott és kódolt scenáriókat használják. Az alkalmazások bizonyítják azt, hogy az adathalmazunk scenáriói alkalmasak MCT feladatok különböző céllal történő, valósídejű összeállítására és kiszolgálására, 2D-ben és 3D-ben egyaránt.

Konferenci cikkek:

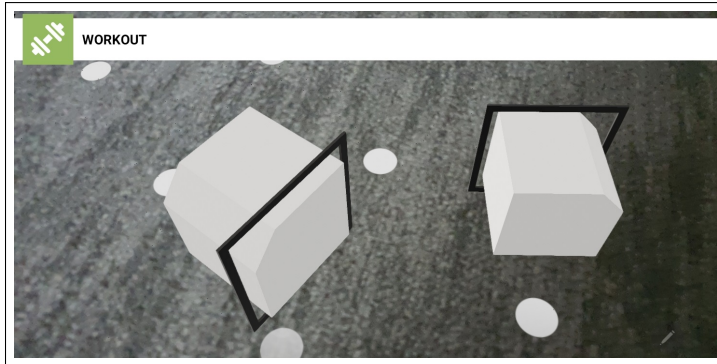
- R. Tóth, Miklós Hoffmann, Kósa és Zichar, 2019
- R. Tóth, Zichar és Miklós Hoffmann, 2020
- R. Tóth, Zichar és Miklós Hoffmann, 2021
- R. Tóth, B. Tóth, Zichar és tsai., 2023b

Konferencia-előadások:

- R. Tóth, Miklós Hoffmann, Kósa és Zichar, 2020
- R. Tóth, Miklós Hoffmann és Zichar, 2023b

Utolsóként a fő tudományos eredményeink lehetséges felhasználására adtunk példákat; a különféle alkalmazások fejlesztése során gyűjtött tapasztalatok ugyanis fontos szerepet játszottak a permutálás és a kódolás megtervezésében, továbbá tesztelni és bizonyítani is az alkalmazások használatával tudtuk az eljárások alkalmazhatóságát.

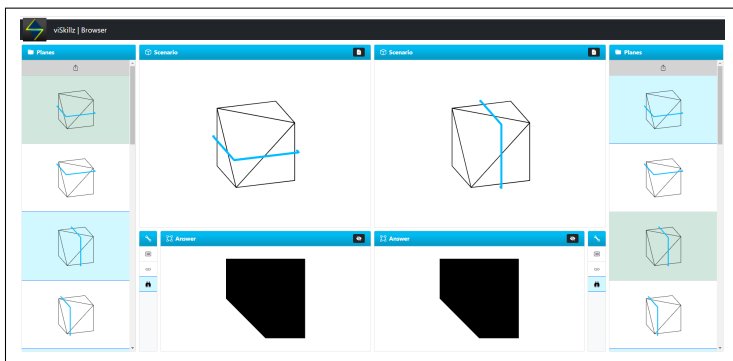
A legelső fejlesztési irányunkat egy olyan játékosított mobilalkalmazás jelentette, mely MCT feladatokat kínált a felhasználói számára. Az eredeti formátumot egy AR nézegető használatával fejlesztettük tovább (lásd 2.9. ábra). A *viSkillz Play* alkalmazás egy Android-platformos pilot projekt volt, ezen fejlesztés során realizáltuk az MCT adatbázis szükségességét.



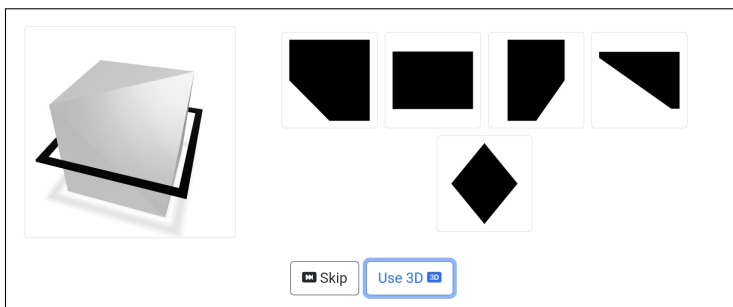
2.9. ábra. Ugyanazon alakzat két példánya egy közös felületre helyezve. A körök azt az észlelt, vízszintes síkot mutatják, melyre a felhasználó egy vagy több modelt helyezhet.

Két webalkalmazást tettünk elérhetővé, miután létrehoztuk az adathalmazunkat. A *viSkillz Browser* alkalmazás (<https://viskillz.inf.unideb.hu/browser>) felhasználói 2D-ben és 3D-ben böngészhetnek az automatikusan előállított szcenáriók hierarchiáját, ezen kívül a szcenáriók közti hasonlóságokat is ellenőrizhetik (lásd 2.10. ábra). Másfelől a *viSkillz Quiz* alkalmazás (<https://viskillz.inf.unideb.hu/quiz>) egyesíti egy egyszerű űrlap és egy MCT teszt funkcionalitását: az alkalmazást számonkérések és mérések szervezésére terveztük, melyek során az MCT feladatok mellett kiegészítő kérdések is kitűzhetők a felhasználók számára (lásd 2.11. ábra).

Később ezen alkalmazásokkal teszteltük a veszteségmentes kódolási eljárásunkat, bizonyítva ezzel azt, hogy az adathalmaz hatékonyan elérhető és kiszolgálható különböző platformokon, 2D-ben és 3D-ben egyaránt. Ezen kívül egy helyi mérést is szerveztünk a karunkon annak érdekében, hogy a hallgatók megoldásai és kiegészítő válaszaik alapján további kutatási irányokat határozhassunk meg.



2.10. ábra. A *viSkillz Browser* alkalmazás képernyőképe asztali böngészőben.



2.11. ábra. Egy feladat az aktivált 3D nézegetővel.

3. Irodalomjegyzék

- [1] F. Alpiste Penalba, J. Torner Ribé és M.A. Brigos Hermida. „EXPLORING VIRTUAL REALITY TO IMPROVE ENGINEERING STUDENTS’ SPATIAL ABILITIES. PILOT STUDY”. *EDULEARN19 Proceedings*. 11th International Conference on Education and New Learning Technologies. Palma, Spain: IATED, 2019. júl., 6275–6284. old. ISBN: 978-84-09-12031-4. DOI: 10.21125/edulearn.2019.1503.
- [2] Alan J. Bishop. „Spatial abilities and mathematics education – A review”. *Educational Studies in Mathematics* 11.3 (1980. aug.), 257–269. old. ISSN: 1573-0816. DOI: 10.1007/BF00697739.
- [3] Nina Bohlmann és Ralf Benölken. „Complex Tasks: Potentials and Pitfalls”. *Mathematics* 8.10 (2020). ISSN: 2227-7390. DOI: 10.3390/math8101780.
- [4] CEEB. *CEEB Special Aptitude Test in Spatial Relations (MCT)*. Developed by the College Entrance Examination Board. 1939.
- [5] Francisco del Cerro Velázquez és Ginés Morales Méndez. „Application in Augmented Reality for Learning Mathematical Functions: A Study for the Development of Spatial Intelligence in Secondary Education Students”. *Mathematics* 9.4 (2021), 369. old. DOI: 10.3390/math9040369.
- [6] Eunhee Chang, Hyun Taek Kim és Byounghyun Yoo. „Virtual reality sickness: A review of causes and measurements”. en. *Int. J. Hum. Comput. Interact.* 36.17 (2020), 1658–1682. old. DOI: 10.1080/10447318.2020.1778351.
- [7] Yu-ching Chen. „Effect of Mobile Augmented Reality on Learning Performance, Motivation, and Math Anxiety in a Math Course”. *Journal of Educational Computing Re-*

- search* 57.7 (2019), 1695–1722. old. DOI: 10 . 1177 / 073563311985403.
- [8] Cheryl A. Cohen és Mary Hegarty. „Inferring cross sections of 3D objects: A new spatial thinking test”. *Learning and Individual Differences* 22.6 (2012), 868–874. old. ISSN: 1041-6080. DOI: 10.1016/j.lindif.2012.05.007.
- [9] Merryn Cole és tsai. „The Relationship between Spatial Ability and the Conservation of Matter in Middle School”. *Education Sciences* 11.1 (2021). ISSN: 2227-7102. DOI: 10 . 3390/educsci11010004.
- [10] Anne Estapa és Larysa Nadolny. „The effect of an augmented reality enhanced mathematics lesson on student achievement and motivation”. *Journal of STEM education* 16.3 (2015).
- [11] Míriam Flores-Bascuñana, Pascual D Diago, Rafael Villena-Taranilla és Dionisio F Yáñez. „On Augmented Reality for the learning of 3D-geometric contents: A preliminary exploratory study with 6-Grade primary students”. *Education Sciences* 10.1 (2020), 4. old. DOI: 10 . 3390 / educsci10010004.
- [12] Andri Gerber, szerk. *Spatial Abilities. A Workbook for Students of Architecture*. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH, 2020. ISBN: 978-3-0356-2043-6.
- [13] R Gorska, Sheryl Sorby és C Leopold. „Gender differences in visualization skills - An international perspective”. *The Engineering Design Graphics Journal* 62.3 (1998), 10. old.
- [14] Nathan W. Hartman és tsai. „Virtual reality-based spatial skills assessment and its role in computer graphics education”. *ACM SIGGRAPH'06 Proceedings*. 2006, 46. old. DOI: 10.1145/1179295.1179342.

- [15] Omar Huerta és tsai. „An approach to improve technical drawing using VR and AR tools”. *Computer-Aided Design and Applications* 17.4 (2019. nov.), 836–849. old. DOI: 10 . 14733/cadaps . 2020 . 836–849.
- [16] Ian Lochhead, Nick Hedley, Arzu Çöltekin és Brian Fisher. „The Immersive Mental Rotations Test: Evaluating Spatial Ability in Virtual Reality”. *Frontiers in Virtual Reality* (2022), 5. old. DOI: 10 . 3389/frvir . 2022 . 820237.
- [17] Rita Nagy-Kondor és Saeed Esmailnia. „Polyhedrons vs. curved surfaces with mental cutting: impact of spatial ability”. *Acta Polytechnica Hungarica* 18.6 (2021), 71–83. old. DOI: 10 . 12700/APH . 18 . 6 . 2021 . 6 . 4.
- [18] B Nemeth és M Hoffmann. „Gender differences in spatial visualization among engineering students”. *Annales Mathematicae et Informaticae* 33 (2006), 169–174. old. ISSN: 1787-5021.
- [19] Brigitta Németh, Csilla Sörös és Miklós Hoffmann. „Typical mistakes in Mental Cutting Test and their consequences in gender differences”. *Teaching Mathematics and Computer Science* 5.2 (2007), 385–392. old. DOI: 10 . 5485/TMCS . 2007 . 0169.
- [20] Christos Papakostas, Christos Troussas, Akrivi Krouska és Cleo Sgouropoulou. „Exploration of Augmented Reality in spatial abilities training: A systematic literature review for the last decade”. en. *Informatics in Education* 20.1 (2021. márc.), 107–130. old. DOI: 10 . 15388/infedu . 2021 . 06.
- [21] Plamen D Petrov és Tatiana V Atanasova. „The Effect of Augmented Reality on Students’ Learning Performance in Stem Education”. *Information* 11.4 (2020), 209. old. DOI: 10 . 3390/info11040209.

- [22] Norma Presmeg. „Spatial Abilities Research as a Foundation for Visualization in Teaching and Learning Mathematics”. *Critical Issues in Mathematics Education: Major Contributions of Alan Bishop*. Szerk. Philip Clarkson és Norma Presmeg. Boston, MA: Springer US, 2008, 83–95. old. ISBN: 978-0-387-09673-5. DOI: 10 . 1007 / 978 - 0 - 387 - 09673 - 5_6.
- [23] Norma Presmeg. „Visualization and Learning in Mathematics Education”. *Encyclopedia of Mathematics Education*. Szerk. Stephen Lerman. Cham: Springer International Publishing, 2020, 900–904. old. ISBN: 978-3-030-15789-0. DOI: 10 . 1007/978-3-030-15789-0_161.
- [24] Claudia Quaiser-Pohl. „The Mental Cutting Test "Schritte" and the Picture Rotation Test-Two New Measures to Assess Spatial Ability”. *International Journal of Testing* 3.3 (2003. szept.), 219–231. old. DOI: 10 . 1207 / s15327574ijt0303_2.
- [25] G. Raju, S. Sorby és C. Reid. „INVESTIGATING THE RELATIONSHIP BETWEEN SPATIAL SKILLS AND ENGINEERING DESIGN”. *ICERI2022 Proceedings*. 15th annual International Conference of Education, Research and Innovation. Seville, Spain, 2022. nov., 421–426. old. ISBN: 978-84-09-45476-1. DOI: 10 . 21125/iceri . 2022 . 0144.
- [26] Albert A Rizzo és tsai. „The virtual reality mental rotation spatial skills project”. *CyberPsychology & Behavior* 1.2 (1998), 113–119. old.
- [27] Parviz Safadel és David White. „Effectiveness of computer-generated virtual reality (VR) in learning and teaching environments with spatial frameworks”. *Applied Sciences* 10.16 (2020), 5438. old. DOI: 10 . 3390/app10165438.

- [28] Dimitrios Saredakis és tsai. „Factors associated with virtual reality sickness in head-mounted displays: A systematic review and meta-analysis”. en. *Front. Hum. Neurosci.* 14 (2020), 96. old. DOI: 10.3389/fnhum.2020.00096.
- [29] Sheryl A. Sorby. „Educational Research in Developing 3-D Spatial Skills for Engineering Students”. *International Journal of Science Education* 31.3 (2009), 459–480. old. DOI: 10.1080/09500690802595839.
- [30] Thomas Suselo, Burkhard C Wünsche és Andrew Luxton-Reilly. „Using Mobile Augmented Reality for Teaching 3D Transformations”. *Proceedings of the 52nd ACM Technical Symposium on Computer Science Education.* 2021, 872–878. old. DOI: 10.1145/3408877.3432401.
- [31] Maria Grazia Tosto és tsai. „Why do spatial abilities predict mathematical performance?”: *Developmental Science* 17.3 (2014), 462–470. old. DOI: 10.1111/desc.12138.
- [32] W. Zimmermann, S. Cunningham és Mathematical Association of America. Committee on Computers in Mathematics Education. *Visualization in Teaching and Learning Mathematics: A Project.* MAA Notes and reports series. Mathematical Association of America, 1991. ISBN: 9780883850718.

4. Releváns publikációk listája

Referált folyóiratcikkek

- [J1] Róbert Tóth. „Script-aided generation of Mental Cutting Test exercises using Blender”. *Annales Mathematicae et Informaticae* 54 (2021), 147–161. old. DOI: 10 . 33039 / ami . 2021 . 03 . 011.
- [J2] Róbert Tóth, Miklós Hoffmann és Marianna Zichar. „Loss-less Encoding of Mental Cutting Test Scenarios for Efficient Development of Spatial Skills”. *Education Sciences* 13.2 (2023). ISSN: 2227-7102. DOI: 10 . 3390 / educsci13020101.
- [J3] Róbert Tóth, Bálint Tóth, Miklós Hoffmann és Marianna Zichar. „viskillz-blender - A Python package to generate assets of Mental Cutting Test exercises using Blender”. *SoftwareX* 22 (2023), 101328. old. ISSN: 2352-7110. DOI: 10 . 1016 / j . softx . 2023 . 101328.

Konferenciakötetben megjelent cikkek

- [I1] Róbert Tóth, Miklós Hoffmann, Márk Kósa és Marianna Zichar. „Játékosított alkalmazások a programozási ismeretek és a térlátási képességek fejlesztésére”. *A 16 éves PE-ME XIX. PhD-Konferenciájának előadásai*. Budapest, 2019, 358–365. old.
- [I2] Róbert Tóth, Bálint Tóth, Marianna Zichar és tsai. „Detecting and Correcting Errors in Mental Cutting Test Intersections Computed with Blender”. *ICGG 2022 - Proceedings of the 20th International Conference on Geometry and Graphics*. Cham: Springer International Publishing, 2023, 904–916. old. DOI: doi . org / 10 . 1007 / 978 - 3 - 031 - 13588 - 0_79.

- [13] Róbert Tóth, Bálint Tóth, Marianna Zichar és tsai. „Educational Applications to Support the Teaching and Learning of Mental Cutting Test Exercises”. *ICGG 2022 - Proceedings of the 20th International Conference on Geometry and Graphics*. Cham: Springer International Publishing, 2023, 928–938. old. ISBN: 978-3-031-13588-0. DOI: doi . org / 10 . 1007 / 978 - 3 - 031 - 13588 - 0 _ 81.
- [14] Róbert Tóth, Marianna Zichar és Miklós Hoffmann. „Gamified Mental Cutting Test for enhancing spatial skills”. *2020 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. 2020, 299–000304. old. DOI: 10 . 1109 / CogInfoCom50765 . 2020 . 9237888.
- [15] Róbert Tóth, Marianna Zichar és Miklós Hoffmann. „Improving and Measuring Spatial Skills with Augmented Reality and Gamification”. *ICGG 2020 - Proceedings of the 19th International Conference on Geometry and Graphics*. Cham: Springer International Publishing, 2021, 755–764. old. DOI: https : // doi . org / 10 . 1007 / 978 - 3 - 030 - 63403 - 2 _ 68.

Könyvfejezetek

- [B1] Róbert Tóth és Marianna Zichar. „Augmented and Gamified Lives”. *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. Szerk. Newton Lee. Cham: Springer International Publishing, 2020, 1–6. old. ISBN: 978-3-319-08234-9. DOI: 10 . 1007 / 978 - 3 - 319 - 08234 - 9 _ 89 - 1.

További konferencia-előadások

- [C1] Róbert Tóth, Miklós Hoffmann, Márk Kósa és Marianna Zichar. „Motivating students’ study with ICT”. ICAI 2020 11th International Conference on Applied Informatics. Eger, 2020. URL: https://icai.uni-eszterhazy.hu/2020/abstracts/ICAI_2020_abstract_093.pdf.

- [C2] Róbert Tóth, Miklós Hoffmann és Marianna Zichar. „viSkillz – a project dealing with Mental Cutting Test exercises”. ICAI 2023 12th International Conference on Applied Informatics. Eger, 2023. URL: https://icai.uni-eszterhazy.hu/2023/abstracts/ICAI_2023_abstract_065.pdf.



Nyilvántartási szám: DEENK/374/2023.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Tóth Róbert

Doktori Iskola: Informatikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10068147

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű, külföldi könyvrészletek (1)

1. **Tóth, R.**, Bodroginé Zichar, M.: Augmented and Gamified Lives.

In: Encyclopedia of Computer Graphics and Games / Newton Lee, Springer, Cham, 1-6, 2021.

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

2. **Tóth, R.**: Script-aided generation of Mental Cutting Test exercises using Blender.

Ann. Math. Inform. 54, 147-161, 2021. ISSN: 1787-5021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.33039/ami.2021.03.011>

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

3. **Tóth, R.**, Hoffmann, M., Bodroginé Zichar, M.: Lossless Encoding of Mental Cutting Test Scenarios for Efficient Development of Spatial Skills.

Educ. Sci. 13 (2), 1-21, 2023. EISSN: 2227-7102.

DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/educsci13020101>

IF: 3 (2022)

4. **Tóth, R.**, Tóth, B., Hoffmann, M., Bodroginé Zichar, M.: viskíllz-blender - A Python package to generate assets of Mental Cutting Test exercises using Blender.

SoftwareX. 22, 1-6, 2023. ISSN: 2352-7110.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.softx.2023.101328>

IF: 3.4 (2022)

Magyar nyelvű konferencia közlemények (1)

5. **Tóth, R.**, Hoffmann, M., Kósa, M., Bodroginé Zichar, M.: Játékosított alkalmazások a programozási ismeretek és a térlátási képességek fejlesztésére.

In: A 16 éves PEME XIX. PhD - Konferenciájának előadásai. Szerk.: Koncz István, Szova Ilona, Professzorok az Európai Magyarorszáért Egyesület, Budapest, 358-365, 2019. ISBN: 9786155709098





Idegen nyelvű konferencia közlemények (4)

6. **Tóth, R.,** Tóth, B., Bodroginé Zichar, M., Fazekas, A., Hoffmann, M.: Detecting and Correcting Errors in Mental Cutting Test Intersections Computed with Blender.
In: ICGG 2022 - Proceedings of the 20th International Conference on Geometry and Graphics / Liang-Yee Cheng, Springer, Cham, 904-916, 2022. ISBN: 9783031135873
7. **Tóth, R.,** Tóth, B., Bodroginé Zichar, M., Fazekas, A., Hoffmann, M.: Educational Applications to Support the Teaching and Learning of Mental Cutting Test Exercises.
In: ICGG 2022 - Proceedings of the 20th International Conference on Geometry and Graphics / Liang-Yee Cheng, Springer, Cham, 928-938, 2022. ISBN: 9783031135873
8. **Tóth, R.,** Bodroginé Zichar, M., Hoffmann, M.: Improving and Measuring Spatial Skills with Augmented Reality and Gamification.
In: ICGG 2020 - Proceedings of the 19th International Conference on Geometry and Graphics / Liang-Yee Cheng, Springer, Cham, 755-764, 2021. ISBN: 9783030634025
9. **Tóth, R.,** Bodroginé Zichar, M., Hoffmann, M.: Gamified Mental Cutting Test for enhancing spatial skills.
In: 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2020) / Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), IEEE, New York, 299-304, 2020. ISBN: 9781728182148

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (2)

10. **Tóth, R.,** Hoffmann, M., Bodroginé Zichar, M.: viSkillz - a project dealing with Mental Cutting Test exercises.
In: ICAI 2023 - 12th International Conference on Applied Informatics, Eszterházy Károly Egyetem, Eger, 1-2, 2023.
11. **Tóth, R.,** Hoffmann, M., Kósa, M., Bodroginé Zichar, M.: Motivating students' study with ICT.
In: The 11th International Conference on Applied Informatics (ICAI 2020). Ed.: Fazekas István, Kovászai Gergely, Eszterházy Károly Egyetem, Eger, 1, 2020.

További közlemények

Idegen nyelvű, külföldi könyvrészletek (1)

12. **Tóth, R.,** Kósa, M., Pánovics, J.: Automatic evaluation application for supporting database courses.
In: Education - Technology - Computer science in building better future. Szerk.: Elzbieta Salata, Agata Buda, Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu, Radom, Poland, 127-134, 2018, (Monografia, ISSN 1642-5278 ; 222.) ISBN: 9788373518605





Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (1)

13. Balla, D. Z., Bodroginé Zichar, M., **Tóth, R.**, Kiss, E., Karancsi, G., Mester, T.: Geovisualization Techniques of Spatial Environmental Data Using Different Visualization Tools.
Appl. Sci.-Basel. 10 (19), 1-14, 2020. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app10196701>
IF: 2.679

Magyar nyelvű konferencia közlemények (6)

14. **Tóth, R.**, Kósa, M., Pánovics, J.: Programozási nyelvek oktatása a Debreceni Egyetem Informatikai Karának megújult mérnökinformatikus alapképzésén = Teaching Programming Languages in the Renewed Computer Science Engineering BSc Program at the Faculty of Informatics, University of Debrecen.
In: ENELKO 2019, SzámOkt 2019, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Temesvár, 233-238, 2019, (ISSN 1842-4546 ; 29)
15. **Tóth, R.**, Kósa, M., Kádek, T., Pánovics, J.: A ProgCont rendszer új szolgáltatásaira épülő alkalmazások = applications based on the new services of the ProgCont system.
In: ENELKO 2018 XIX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2018 XXVIII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia. Szerk.: Biró Károly-Ágoston, Sebestyén-Pál György, Szabó Loránd, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Tusnádfürdő, 331-336, 2018, (ISSN 1842-4546)
16. **Tóth, R.**, Kádek, T., Kósa, M., Pánovics, J.: Kiértékeléssel kapcsolatos informatikai fejlesztések a Debreceni Egyetem Informatikai Karán.
In: A 15 éves PEME XVII. PhD-Konferenciájának előadásai. Szerk.: Koncz István, Szova Ilona, Professzorok az Európai Magyarorszáért Egyesület, Budapest, 160-171, 2018. ISBN: 9786155709050
17. **Tóth, R.**, Kósa, M., Kádek, T., Pánovics, J.: A programozástanulás játékosítása = learning programming through gamification.
In: ENELKO 2017 XVIII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2017 XXVII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Kolozsvár, 2017. október 12-15. Szerk.: Biró Károly-Ágoston, Sebestyén-Pál György, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Cluj-Napoca, 230-235, 2017, (ISSN 1842-4546)
18. **Tóth, R.**, Kádek, T., Kósa, M., Pánovics, J.: Feladatajánlás döntéstámogató algoritmusokkal.
In: ENELKO 2016 XVII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2016 XXVI. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Kolozsvár, 2016. október 6-9. Szerk.: Biró Károly-Ágoston, Sebestyén-Pál György, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Cluj-Napoca, 300-305, 2016, (ISSN 1842-4546)





19. **Tóth, R.**, Kósa, M., Kádek, T., Pánovics, J.: ProgContR: mentor alkalmazás a SmartCampusban.
In: ENELKO 2015 XVI. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2015 XXV. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Arad, 2015. október 8-11.
Szerk.: Biró Károly-Ágoston, Sebestyén-Pál György, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Cluj-Napoca, 328-333, 2015, (ISSN 1842-4546)

Időgen nyelvű konferencia közlemények (4)

20. Balla, D. Z., Bodroginé Zichar, M., **Tóth, R.**, Kiss, E., Karancsi, G., Lázár, V., Baranyi, I., Mester, T.: Visualization of Water Quality Index using Keyhole Markup Language.
In: LXII. Georgikon Napok konferenciakötet : A klímaváltozás kihívásai a következő évtizedekben. Szerk.: Lukács Gábor, Szanati Angéla, Szent István Egyetem, Georgikon Kar, Keszthely, 1-6, 2021. ISBN: 9789632699424
21. **Tóth, R.**, Balla, D. Z., Bodroginé Zichar, M.: Analysis and Optimization of KML Files.
In: INTED2020 : conference proceedings / L. Gómez Chova, A. López Martínez, I. Candel Torres, IATED Academy, Valencia, 4209-4216, 2020, (INTED Proceedings, ISSN 2340-1079) ISBN: 9788409179398
22. **Tóth, R.**, Kósa, M., Kádek, T., Pánovics, J.: The Development of Evaluation Systems at the Faculty of Informatics, University of Debrecen.
In: INTED2019 13th International Technology, Education and Development Conference : conference proceedings / L. Gómez Chova, A. López Martínez, I. Candel Torres, IATED Academy, Valencia, Spain, 5552-5559, 2019, (ISSN 2340-1079) ISBN: 9788409086191
23. Adamkó, A., Kádek, T., Kollár, L., Kósa, M., **Tóth, R.**: Cluster and discover services in the smart campus platform for online programming contests.
In: 6th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2015 : Proceedings, October 19-21, 2015, Széchenyi István University Győr, Hungary, IEEE, Danvers, 385-389, 2015. ISBN: 9781467381291





Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (1)

24. Balla, D. Z., Bodroginé Zichar, M., **Tóth, R.**, Kiss, E., Karancsi, G., Lázár, V., Baranyi, I., Mester, T.: Visualization of Water Quality Index using Keyhole Markup Language.
In: A klímaváltozás kihívásai a következő évtizedekben : 62. Georgikon Napok : Előadások kivonatai, Szent István Egyetem Georgikon Kar, Keszthely, 12, 2020.

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 9,079

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre): 6,4

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2023.08.17.



Short thesis for the degree of doctor of philosophy (PhD)

**Methods, packages, and applications for the
development and use of Mental Cutting Test
exercises**

Tóth Róbert

Supervisor: Dr. Zichar Marianna



UNIVERSITY OF DEBRECEN
Doctoral School of Informatics
Debrecen, 2023

Contents

1	Introduction and motivation	2
1.1	Background	2
1.2	Our research	4
2	New scientific results and theses of the dissertation	7
2.1	Designing MCT scenarios in Blender	7
2.2	Permuting MCT scenarios using Blender	11
2.3	Post-processing MCT assets	16
2.4	Encoding GLB assets of MCT scenarios	20
2.5	Using the MCT dataset	26
3	References	29
4	List of relevant publications	34

1. Introduction and motivation

1.1. Background

Spatial abilities, such as visuospatial perception, spatial visualization and orientation, mental folding, mental cutting, and mental rotation, play an important role in everyday life as well as in solving complex mathematical problems and engineering design tasks (see, e.g., Bohlmann and Benölken, 2020; Bishop, 1980; Tosto et al., 2014; Cole et al., 2021; Zimmermann, Cunningham, and America. Committee on Computers in Mathematics Education, 1991; Raju, S. Sorby, and Reid, 2022; S. A. Sorby, 2009). The development of spatial skills in the teaching of STEM fields is a challenging task that may require various tools in various pedagogical situations, including planar drawings, real spatial models, and software (Presmeg, 2020; Presmeg, 2008; Gerber, 2020). The primary goal is to map the optimal and effective combination of these tools, including virtual and augmented reality applications, which were proven to be successful in the effective development of spatial skills and competencies (Alpiste Penalba, Torner Ribé, and Brigos Hermida, 2019; Huerta et al., 2019; Estapa and Nadolny, 2015; Chen, 2019; Cerro Velázquez and Morales Méndez, 2021; Petrov and Atanasova, 2020; Flores-Bascuñana, Diago, Villena-Taranilla, and Yáñez, 2020; Suselo, Wünsche, and Luxton-Reilly, 2021). A recent systematic overview of this topic can be found in Papakostas, Troussas, Krouska, and Sgouropoulou, 2021. Overall, there is a significant demand for applying emerging technologies that could support the development and evaluation of spatial skills through electronic versions of classical tests.

Several researchers started to deal with VR in the last decade and design applications aiming to improve the users' spatial skills with the VR function (Rizzo et al., 1998; Lochhead, Hedley, Çöltekin, and Fisher, 2022; Hartman et al., 2006). This approach proved effective and yielded better results than simple paper-

and-pencil exercises (Safadel and White, 2020). However, the initial popularity of VR and the motivation of users started to decrease. The main reasons are clear. First, using VR requires investing in special headgear and powerful hardware. This means that students either have to buy their own devices to participate in these exercises or universities and researchers must provide enough devices for their students. Manufacturers have started to develop plastic or paper frames where users can put their mobile phones and imitate the functions of a VR headset. This provides a less expensive but low-quality method of creating the necessary environment. On the other hand, using VR headgear frequently causes discomfort, so many users cannot wear it (or only wear it for a limited time) (Saredakis et al., 2020; Chang, Kim, and Yoo, 2020).

There are various, now standard tests to measure these skills. One of these tools is the so-called Mental Cutting Test (MCT), which was originally designed as a part of a college entrance examination test (CEEB, 1939). There are also recent adjustments to this test (Quaiser-Pohl, 2003; Cohen and Hegarty, 2012), but the classical test is still among the most frequently applied method to assess spatial skills, and the form of tasks are standard in each version. An MCT task (also called scenario) contains a 2D projection of a 3D shape and a cutting plane. The exercise seems simple: determine the shape created by intersecting the 3D shape with the plane and select the figure representing the solution out of five candidates. However, scenarios can be constructed with different levels of difficulty. Previous research showed that the difficulty of an exercise strongly depends on the shape and similarity of possible answers (Németh, Sörös, and Miklós Hoffmann, 2007; Nagy-Kondor and Esmailnia, 2021). If alternatives contain easy-to-recognize differences, a scenario proves to be easier; however, if several alternatives contain very similar features and differ only in minor details, the exercise becomes more complicated.

During the last decades, most researchers and educators used a well-known sheet containing 25 scenarios derived from various shapes and cutting planes (see Figure 2.1), with widely permuted possible answers resulting in a wide range of difficulty levels (Gorska, Sheryl Sorby, and Leopold, 1998; Nemeth and Hoffmann, 2006). However, this limited number of available scenarios highly restricts the effective practice and improvement of spatial skills in education.

1.2. Our research

Our research was started in 2019. Our initial goal was to develop a gamified mobile application to offer its users MCT exercises. To support them during the practice, we implemented an AR-based viewer with the use of which users are able to check the scenarios of the exercises in 3D without losing information in 2D. Additionally, the implementation of a VR activity was planned to offer another tool for visualization. Moreover, we used the most popular gamified elements to engage and motivate users to use the application. This time, the *viSkillz Play* pilot application was finished.

Using Blender, we created a schema (see Figure 1.1) for constructing exercises from assets. In our procedure, instructors design models and yield assets required to form an exercise: the 2D image of a scenario (containing a mesh and a frame representing a cutting plane) and five intersections served as possible answers. Following the original format of MCT exercises, one shape of the set is the correct answer, and four others are served as invalid, wrong answers. We realized that the easiest way to form an exercise is to derive these additional shapes from other scenarios.

However, we soon realized that the original vision could not be implemented without solving significant issues related to MCT exercises: There was no well-known database offering hundreds or thousands of exercises. There was no well-known process to generate exercises. There is no proven test creation method based

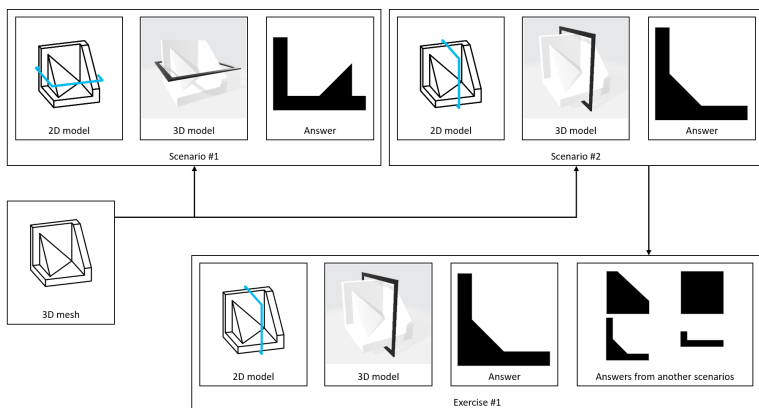


Figure 1.1: Our schema for constructing an MCT exercise from multiple scenarios.

on the users' skills. Moreover, we realized that the manual design of assets requires high effort from instructors, and a more efficient method should be developed to perform the necessary steps.

We started new research directions to enhance the process of developing and using the MCT exercises. First, we designed more than 200 models based on the well-known sheet and 19 cutting planes in Blender. Second, we implemented a script-aided method using Blender's Python API, which could automate most of the required steps to yield assets for exercises. Finally, the first version of our dataset allowed us to examine the assets, including their possible permutation factors, common anomalies, and the limitations of the process.

Parallel, we realized that a mobile application is not the best tool to test students' visual skills since most schools and faculties need to be better equipped with tablets or mobiles. Moreover, bringing one VR headgear to a classroom is not suitable. Parallel, Samsung suspended the support of its Galaxy VR technology, predicting a drop in the popularity of VR technologies.

Thus, we started to focus on the technical background of the assessments while moving our developments to the web platform. This time, we found solutions for problems related to miscalculations of Blender and extended our script-aided method to support additional intersection planes and permutation factors. Developing our applications *viSkillz Browser* and *viSkillz Quiz*, we encountered into another issue: the dataset containing hundred thousands of possible permutations required too much storage space; thus, we were unable to deploy the applications using the entire dataset. In the next phase, we designed a multi-level encoding scheme to store the 3D assets efficiently, enabling developers to manage the dataset. Parallel, we published applications *viSkillz Browser* and *viSkillz Quiz* to test the encoding methods. Finally, we organized a pilot measurement at our faculty to gain experience with the web-based 3D viewer and test whether it affects the results of students having various knowledge and experience about spatial tests and 3D games.

2. New scientific results and theses of the dissertation

2.1. Designing MCT scenarios in Blender

Thesis 1

We designed 205 shapes and 31 cutting planes manually in Blender. These shapes are derived from the classic Mental Cutting Test exercises and can be used to analyze the shapes and develop scripts to yield assets.

Journal papers:

- R. Tóth, 2021
- R. Tóth, B. Tóth, Miklós Hoffmann, and Zichar, 2023

The process of our research started with the modeling of the 25 classic meshes (see Figure 2.1). Our goal was to minimize the difference between the original images and our models, while some features of the shapes had to be handled carefully to avoid rendering and processing anomalies. On the other hand, the figures of the sheet contain easy-to-recognize errors that can be derived from the sequence of continuous printing and scanning operations that resulted in the current state of the paper sheet. For example, some lines are non-parallel should be anyway, and relationships between the models and intersections are sometimes broken.

Each mesh has a maximum length of 2.0 in each dimension, while at least one dimension exactly has a length of 2.0. Thus, our meshes have consistent sizes, which makes further processing steps easier and deterministic. Origins are also set carefully to the median of each dimension to support rotation transformations. In the case of some meshes, we made a few minor adjust-

ments to avoid containing a large number of edges and vertices in the used cutting planes. Instructors should avoid useless vertices and edges; manually performed subdivision is not required in the case of most scenarios.

However, manually designed meshes can also contain minor errors that can be resulted from floating precision errors. Most models can be designed easily using Blender's *Boolean* modifier, which computes the intersection, the difference, and the union of two meshes. During the modeling phase, we detected common miscalculations of this modifier. Thus, we tried to model our meshes without using the *Boolean* modifier and creating most of the vertices, edges, and faces by starting from simple shapes and applying atomic operations manually to them. However, Blender offers a great set of *Clean Up* methods that are worth applying to our models: *Delete Loose*, *Degenerate Dissolve*, *Make Planar Faces*, and *Split Non-Planar Faces*. There is another important operation in Blender's *Edit Mode*, called *Triangulate Faces*. This operator traverses all the faces and splits them into multiple faces to form a mesh containing only triangles. That step has to be involved in the modeling phase to provide the base for better computations.

Each mesh was checked for non-planar faces using the *Split Non-Planar Faces* operator with a limit of 0.5° . Each mesh was modified manually until this operator had no more effect on the mesh, guaranteeing that each face was bent under an acceptable limit. Then each face was triangulated using the operator *Triangulate Faces* with its default parameters. Finally, operators *Degenerate Dissolve* and *Delete Loose* were applied on each mesh, in that order, resulting in clean meshes except for outlier cases caused by the use of the *Boolean* modifier.

To yield a large set of permutations in the upcoming steps, we derived additional meshes from the original shapes that belong to the well-known MCT exercises. In this step, we changed one or more main features of the original meshes, resulting in very

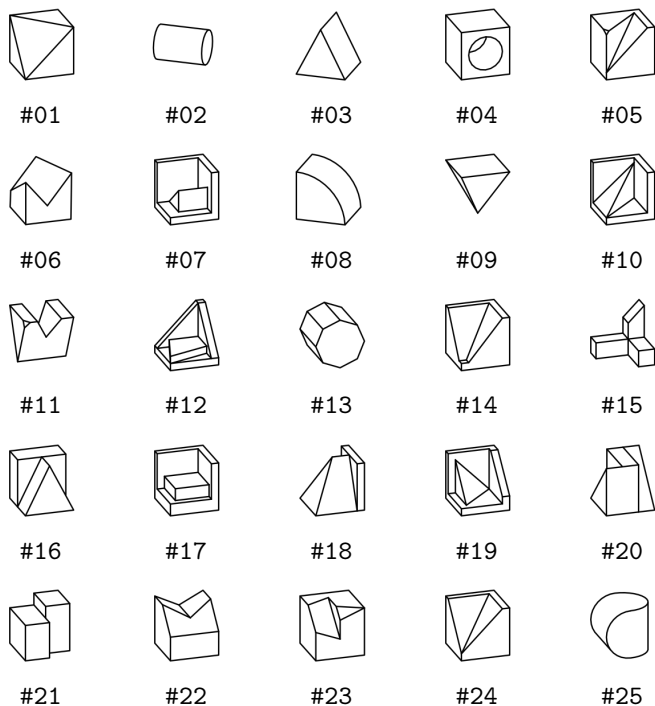


Figure 2.1: Reproduced meshes of the well-known sheet of exercises (<https://viskillz.inf.unideb.hu/resources/mct-classic.pdf>).

similar alternates that differ only in symmetry or ratios in most cases. On the other hand, additional features are introduced, or an existing feature is deleted to retrieve a permutation. Usually, we created nine alternates of each original shape (see Figure 2.2). A mesh can be referred to by its unique ID in format #GGMM, where GG denotes the ID of the group (derived from Figure 2.1) and MM denotes the ID of the actual permutation. ID #GG00 always belongs to the original shape from which the permutations are derived. A set of permutations will be referred to using the #GG iden-

tifier and called *shape group* or *group*.

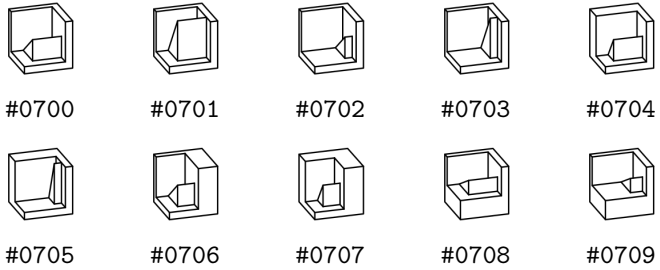


Figure 2.2: We changed the main features of mesh #07 to obtain new permutations. As a result, most of the cutting planes will yield different intersections from various meshes having the same orientation.

2.2. Permuting MCT scenarios using Blender

Thesis 2

We designed a script-aided method that applies pre-defined permutation factors on the manually designed meshes and cutting planes to yield a great number of Mental Cutting Test scenarios.

Journal papers:

- R. Tóth, 2021
- R. Tóth, B. Tóth, Miklós Hoffmann, and Zichar, 2023

Apply scaling

The features of a mesh – especially the aspect ratio of its edges, thus the aspect ratio of the derived intersections – can be changed by scaling each mesh in one or two global directions; thus, we introduce a set of scaling vectors having values 0.7 and 1.0 in different combinations (see Figure 2.3). After introducing the seven scaling vectors, a mesh can be referred to with an ID having format #GGMM.SSS where the subsequence GGMM is inherited from the previous manual permutations, while section SSS denotes the ID of the applied scaling vector of the actual shape in which digit 1 denotes scaling factor 0.7, and 0 denotes scaling factor 1.0.

Apply rotation

Additional permutations can be easily generated from each mesh using rotation transformations. As we will intersect each mesh with various planes, the actual orientation of the mesh can change the shape of the intersection. Denote the set of rotation vectors as S^{RV} and a single rotation vector as $r = \{X, Y, Z\}$. Each component of any $r \in S^{RV}$ refers to the amount of rotation ap-

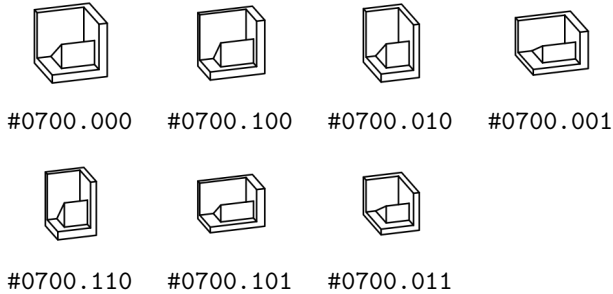


Figure 2.3: Automatically created permutations of mesh #07. Additional shapes can be created by applying each scaling vector S on the same, manually permuted mesh.

plied on the corresponding global axis. The amount of rotation is indicated by a value from set $\{0, 1, 2, 3\}$ that is used as the coefficient of 90° when the counter-clockwise rotation along the corresponding axis is performed. For easier notation, we prefer to give literal values in degrees. Thus, each shape orientation is referenced with an ID with the format $\#GGMM.SSS.RRR$ where subsequence RRR denotes an element of S^{RV} (see Figure 2.4).

Cutting planes

In the initial version of our iterative algorithm, we introduced 19 cutting planes that can be defined with the combination of a point on them and their normal vector in Blender. Later, we added 12 new planes resulting in a set of 31 intersection planes (see Figure 2.5). In a real exercise-designing process, we must check whether a cutting plane results in a non-empty, easy-to-understand shape. However, this research goal focused on the permutation, and our goal is to yield as many different shapes as possible. Thus, all possible combinations of shapes, scaling, rotation and cutting planes should be involved in our computation.

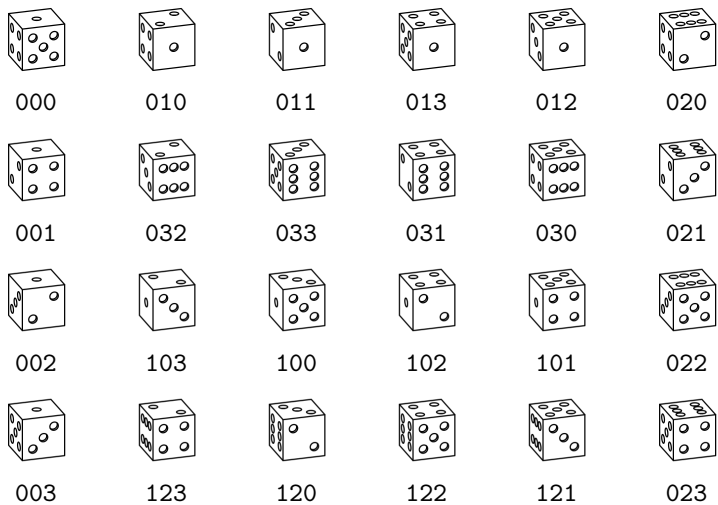


Figure 2.4: Different rotations of a dice. The sequence of numbers under each image denotes the unique ID of the rotation in the specified format. With the use of 24 different rotation vectors, each orientation of the cube can be achieved.

Permute intersections

That recently mentioned method would yield 13888 combinations for each manually permuted mesh with much redundancy. On the other hand, we can reduce the set of rotation vectors and cutting planes since most of the cutting planes can be omitted from the computations and substituted with the combination of another cutting plane and rotation vector. Thus, it is sufficient to use only five cutting planes to fetch all the possible permutations.

Compute and export intersections

Given a permuted mesh, a scaling vector, a rotation vector, and a cutting plane, we should yield their intersection representing the answer. In a nutshell, if a mesh is intersected with a given cutting plane, then the intersection is cleaned and flattened to the XY plane. The shape is translated to the origin and scaled finally. In the iterative algorithm, each shape was rendered at this point, resulting SVG and PNG representations. However, we are going to process the coordinates of each edge and its vertices. Thus, instead of rendering, we fetch the local coordinates of each edge and transform them into the global coordinate system. Each rotation vector is used in Blender's XYZ Euler coordinate system.

The 25 original meshes have various features; however, the handling of four ones is not obvious if the geometry is described with edges instead of curves. Thus, meshes #02, #04, #06, and #25 are excluded from the generation.

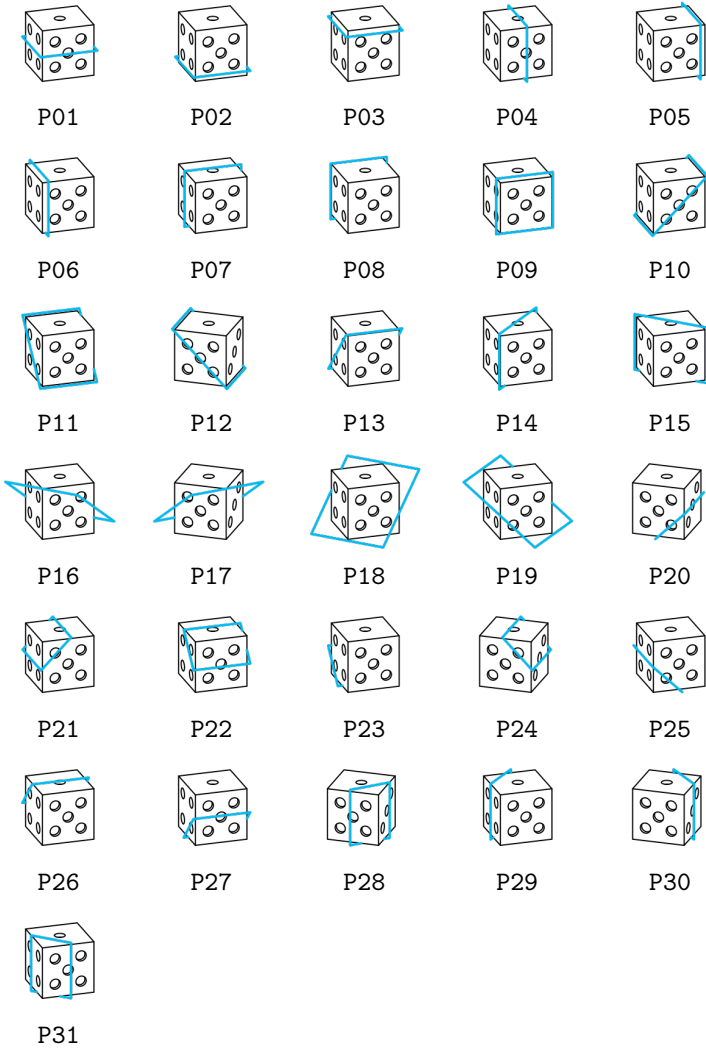


Figure 2.5: The 31 cutting planes.

2.3. Post-processing MCT assets

Thesis 3

We post-processed the output of the permutation script and found anomalies in the SVG assets. We designed and implemented an automated raster-based validation process based on our experience with human validation. Assets having errors due to calculation errors can be corrected, or their corresponding scenario can be dropped automatically.

Conference paper: R. Tóth, B. Tóth, Zichar, et al., 2023a

We should check each automatically generated intersection and determine whether its scenario can be offered as an assignment. The concept of the validation process is designed on the experience of randomly, manually performed validation of previously rendered scenarios. During that period, we found the following abnormal features in the data set:

1. **Noise vertices and edges** – Too short edges and their corresponding vertices appear in many scenarios. We found that these edges can be derived from multiple situations.
 - (a) **Real edges.** Many scenarios contain quite small edges that can be easily considered noise. It is hard to manage them with any algorithm: usually, noise-generated edges are longer than the finest features of the intersections. In the iterative algorithm, the combinations of shapes and cutting planes sometimes result in really small regions or lakes with their corresponding edges. Moreover, the contour of a larger region can also contain small edges due to the same purpose.

- (b) **Noise edges.** Another pattern can be detected in the data set: edges having really small lengths appear near the junctions of other edges, adding extra vertices and edges to the representations. The real purpose of their appearance is unclear in most cases, but they are derived from some kind of miscalculations; thus, they should be eliminated from the representations. We guess that the main purpose of their appearance is the precision error of the IEEE 754 float type, with the use of which each coordinate is represented. Parallel, we found that many of the manually entered literals on Blender's UI immediately change, and an error appears near the 5th or 6th floating digit. In addition, instructors can only make minor precision errors while designing the shapes.
2. **Shapes that are sliver polygons** – Many combinations of intersection planes and 3D meshes result in intersections that contain very short edges; the previous point dealt with that case. However, in rare situations, the intersection can also contain a sliver region or sub-face, whose ratio of its area and perimeter is small. In such cases, the intersection plane just touches an edge of the mesh, resulting in a sliver polygon as their intersection. As a consequence, multiple edges overlap each other, resulting in an abnormal representation.
 3. **Subdivided edges** – Due to the triangulated faces and the behavior of the intersecting method, most of the edges are getting subdivided into multiple smaller edges that can also be referred to as segments. While it is a natural feature of the intersection, it is required to reconstruct the original representation of each intersection, merging the corresponding segments into one edge.

Based on the features of the common errors, it is possible to assign each error to one of the following groups:

1. Errors that can be detected and corrected; after that, the corresponding scenario can be served as an MCT exercise or included as a possible answer.
2. Errors that are derived from the incorrect choice of intersection plane and mesh; thus, the combination cannot be used in an MCT exercise or included as a possible answer.

The proposed algorithm contains four steps that are designed based on the experience of our human-based validation:

1. Removing short edges – We eliminate all the edges whose length is under a given threshold. 1% of the possible lengths is classified as noise.
2. Visualizing edges – We create multiple SVG representations visualizing the original and filtered edges, then convert the assets to raster PNG images.
3. Detecting errors – We detect anomalies based on the visualized edges (e.g., how the filtered, centralized edges overlap the original ones, how many segments can be seen), see Figure 2.6.
4. Resolving errors – We execute a pair-matching algorithm between the filtered set of edges and try to reconstruct the contour of each region in the case of images that can be served as a scenario, but the original representation was incorrect.

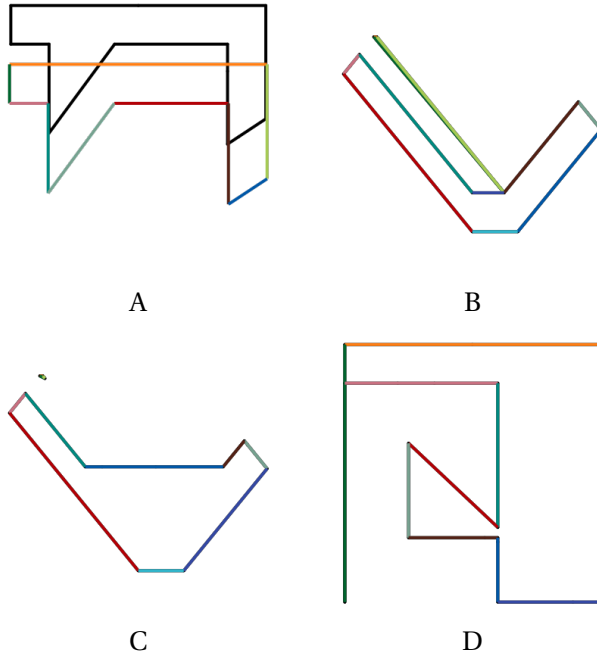


Figure 2.6: Examples of scenarios that contain anomalies in their representation. The original segments are visualized with black segments, and the filtered and re-aligned set of segments is visualized with colored edges. Intersections A and C belong to scenarios having sliver regions, while intersections B and D have two edges that almost overlap each other, making humans unable to detect them.

2.4. Encoding GLB assets of MCT scenarios

Thesis 4

We introduced an encoding scheme consisting of four stages to handle the dataset by significantly reducing the storage space. The proposed method encodes a subset of assets from which it can decode the whole dataset with 3% time complexity compared to classical Blender's computations, exceeding the compression ratio of 10,000 and storage space saving 99.99%.

Journal paper: R. Tóth, Miklós Hoffmann, and Zichar, 2023a

Our dataset with the described permutation steps contains more than 1 million (1,067,640) scenarios, including small redundancy due to the symmetrical features of the shapes. Focusing on the GLB models for supporting AR, VR, and 3D developments, the assets have a total size of 6,521,971,888 bytes, but the needed disk storage is more than 8 GB in a Windows 11 operating system. Therefore, filtering and processing assets or constructing exercises manually or automatically in an application requires storing the dataset in the database. Thus, a method should be found to allow developers to compress the dataset, making us able to serve content in real-time. One possible solution is to find existing compression algorithms; in the case of GLB assets, Draco compression² is a well-known and universal method to compress the assets. However, different features of the permutation algorithm should be detected in the assets. With the design and development of a domain-specific algorithm, it is possible to achieve a better compression ratio.

²<https://google.github.io/draco/> (accessed on 13 August 2023)

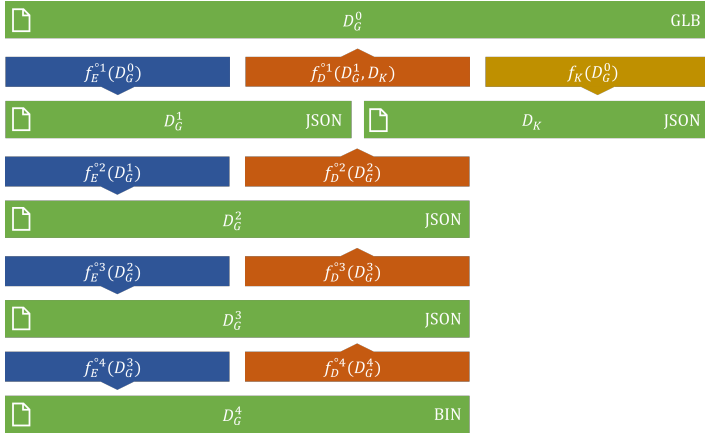


Figure 2.7: The multi-level encoding scheme.

Based on the background knowledge of the permutation factors of scenarios, various data formats can be designed to store the local and global features of assets. We introduced a multi-level scheme shown in Figure 2.7, allowing us to reduce the needed storage to store the dataset and encode the information in the most suitable format for the actual use case. The encoding and decoding steps form a pipeline of individual operations on the dataset; the input of each encoding function is the output of the upper layer, and the input of each decoding function is the output of the lower layer. Each level has its encoding and decoding functions, denoted with $f_E^{\circ L}(D^{L-1})$ and $f_D^{\circ L}(D^L)$, where subscripts E and D refer to *Encoding* and *Decoding*, while superscript $\circ L$ refers to the number of the corresponding level (where $\circ L = 0$ denotes the original dataset and levels are numbered from 1 to 4 inclusive). Thus, the original assets and encoded documents are noted with D_G^L , where the optional subscript G notes the ID of the corresponding group. Moreover, documents can be textured or non-textured. Thus, additional letters T and N can be added optionally to the superscripts to distinguish them, resulting in notations

$D_G^{N \circ L}$ and $D_G^{T \circ L}$.

The key Document

Introduce function $f_K(D_G^0)$ that extracts the globally identical features from a given dataset, including each property mentioned above, and then encodes them in a JSON document. The function can be called with any group of assets since the retrieved properties are globally identical. Consequently, this function must be called only once on a dataset, allowing us to retrieve the needed values in each invocation of $f_D^1(D_G^1)$. Thus, the parameter list of the first decoding function must be extended by introducing another parameter D_k , resulting in the form $f_D^1(D_G^1, D_k)$. The size of the document is 22,958 bytes in the case of textured documents and 19,000 bytes in the case of non-textured documents, using no indentation nor spaces between tokens. On the other hand, the structure of this document can be optimized to achieve a smaller size.

First Level

The encoding function $f_E^1(D_G^0)$ consumes a set of original assets that belong to the same group and then returns a JSON document denoted with D_G^1 , containing all the properties that should be stored to reconstruct the original assets with the use of D_k . The content of the binary chunk is stored without any processing, so the content of the buffer sequence is encoded as a single series of characters, following their original order. The hexadecimal representation of the bytes was chosen since the numerical types stored in the binary chunk have sizes of 2 or 4 bytes. Thus, an encoding is needed such that each value can be encoded with a different series of characters without padding.

With the use of $f_E^1(D_G^0)$, storage sizes can be reduced by 99.91% in the case of $D_G^{T \circ 1}$, achieving a compression ratio of 1065

compared to $D_G^{T\circ 0}$ dataset. Both the compression ratio (99.91%) and the saved storage size (1,077) are similar in the case of $D_G^{N\circ 0}$ and $D_G^{N\circ 1}$.

Second Level

The encoding function $f_E^{\circ 2}(D_G^1)$ returns a second-level encoded JSON document D_G^2 . The new document keeps some properties of D_G^1 but eliminates property accessors by processing and transforming the hexadecimal of the property data. The compression can be performed by substituting the $s \in B_n$ representation of each scalar value with its corresponding $h_n^{\circ 2}(s)$ hash value. The keynote behind this operation is that the count of distinct scalar values (and thus each index value) requires fewer digits to be encoded than the original scalar values with a representation that is 4 or 8 characters long. Thus, the use of $h_n^{\circ 2}(x)$ decreases the size of each buffer using 3, 4, 3, and 1 bytes to hash 242, 13,713, 63, and 118 different values of the buffers using their indices.

With the use of $f_E^{\circ 2}(D_G^1)$, storage sizes can be reduced by 62.02% in the case of $D_G^{T\circ 2}$, achieving a compression ratio of 2.633 compared to the $D_G^{T\circ 1}$ dataset, 2,804 compared to $D_G^{T\circ 0}$.

Third Level

The encoding function $f_E^{\circ 3}(D_G^2)$ consumes a second-level encoded JSON document (D_G^2) and returns a third-level encoded JSON document (D_G^3). Similarly to function $f_E^{\circ 2}(D_G^1)$, its output keeps some properties of the document D_G^2 but applies a second hash function $h_n^{\circ 3}(x)$ on the values of the property data, where subscript n denotes the index of the buffer. The hexadecimal values still contain significant redundancy, observing the data properties of D_G^2 documents. The purpose of this feature is simple, as we have already hashed each scalar value, but the first three buffers contain vectors of types VEC3, VEC3, and VEC2. Not

just the same scalar values, but the same vectors appear multiple times in the original sequences. Thus, the statistical features of the subsequences can be analyzed again, verifying that several triples and pairs of hash values appear multiple times. Using $h_n^{\circ 3}(x)$ decreases the size of the first three buffers using 2, 4, and 1 byte(s) to hash 789, 1179, and 82 different values of the buffers using their indices.

With the use of $f_E^{\circ 3}(D_G^2)$ storage sizes can be reduced by 37.89% in the case of textured documents, achieving a compression ratio of 1.610 compared to the $D_G^{T^{\circ 2}}$ dataset and 4,034 compared to $D_G^{T^{\circ 0}}$ dataset. The values are similar in the case of the non-textured dataset.

Fourth Level

All the previous encoding functions returned valid JSON documents. JSON documents have a lightweight syntax and much less overhead than other formats, such as XML. However, the size of the dataset can be reduced by introducing a binary format instead of a text format. This approach eliminates all tokens of JSON syntax, and our identifiers, as well as the property data, can be encoded as a sequence of bytes instead of hexadecimal character sequences. Moreover, floating numbers in JSON documents are encoded using multiple precision digits but can be encoded using IEEE 754 types. Thus, the encoding function $f_E^{\circ 4}(D_G^3)$ encodes the properties of D_G^3 and decreases the size of the dataset using binary encoding. Figure 2.8 describes the binary format of $D_G^{T^{\circ 4}}$ and $D_G^{N^{\circ 4}}$ documents.

With the use of the binary encoding, storage sizes can be reduced by 53.15% in the case of textured documents, achieving a compression ratio of 2.134 compared to the $D_G^{T^{\circ 3}}$ dataset and 9,634 compared to the $D_G^{T^{\circ 0}}$ dataset. The values are similar in the case of the non-textured dataset.

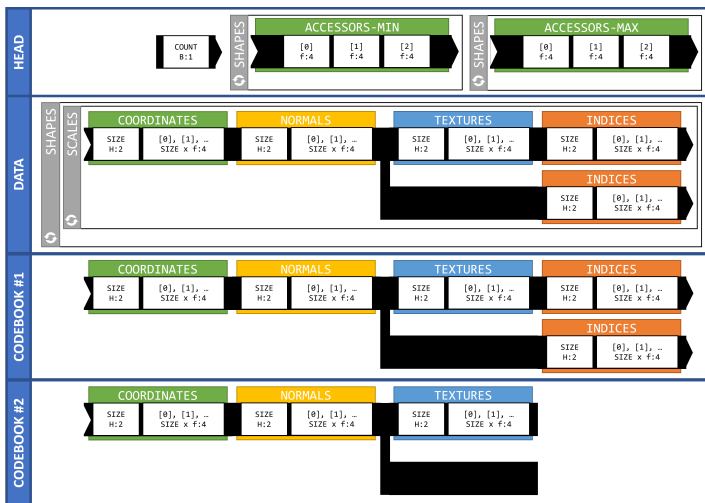


Figure 2.8: The structure of $D_G^{T\circ 4}$ and $D_G^{N\circ 4}$ binary files. Notations of types are derived from the `struct` module of Python.

2.5. Using the MCT dataset

Thesis 5

We developed applications that serve scenarios retrieved, post-processed, and encoded using our proposed methods. The applications prove that scenarios of our dataset can be served in real-time to construct and offer MCT exercises using the available assets in 2D and 3D for various purposes.

Conference papers:

- R. Tóth, Miklós Hoffmann, Kósa, and Zichar, 2019
- R. Tóth, Zichar, and Miklós Hoffmann, 2020
- R. Tóth, Zichar, and Miklós Hoffmann, 2021
- R. Tóth, B. Tóth, Zichar, et al., 2023b

Conference talks:

- R. Tóth, Miklós Hoffmann, Kósa, and Zichar, 2020
- R. Tóth, Miklós Hoffmann, and Zichar, 2023b

Finally, we present possible use cases of our primary scientific results; the development of various applications served as the experience on which we realized the need for script-aided generation and lossless encoding methods, as well as we could test the designed solutions by adding them to these applications.

Our very first research direction was the development of a gamified mobile application that offers MCT exercises to its users and also offers AR to enhance the process (see Figure 2.9). The *viSkillz Play* application was a pilot project on the Android platform and was essential to realize the need for our database.

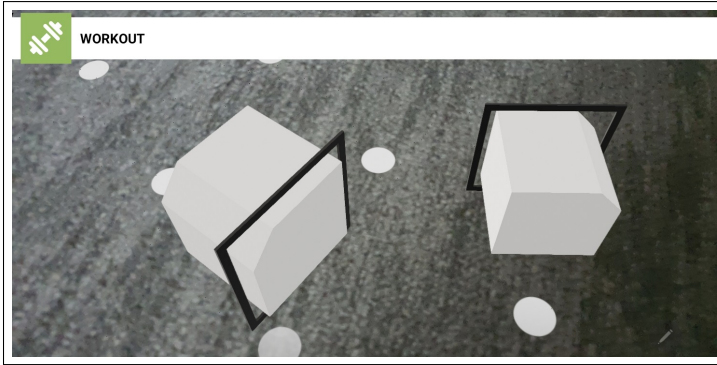


Figure 2.9: Two instances of the same shape, placed on the common surface. Circles show that a horizontal plane is detected, and the user can place one or more models on the surface.

After creating our dataset, we released two web applications. Application *viSkillz Browser* (<https://viskillz.inf.unideb.hu/browser>) offers 2D and 3D viewers to its users to interact with the hierarchy of our automatically generated scenarios and check the similarities between them (see Figure 2.10). On the other hand, application *viSkillz Quiz* (<https://viskillz.inf.unideb.hu/quiz>) merges the functionalities of a basic form application and an MCT test: the application is designed to organize exams and measurements using MCT exercises and asking related questions to the users (see Figure 2.11).

Later, we adopted and tested the lossless encoding scheme using these applications, proving that the dataset can be efficiently accessed and served on multiple platforms in 2D and 3D. Moreover, we organized a local measurement at our faculty to determine the possible research directions based on our students' spatial skills and additional answers.

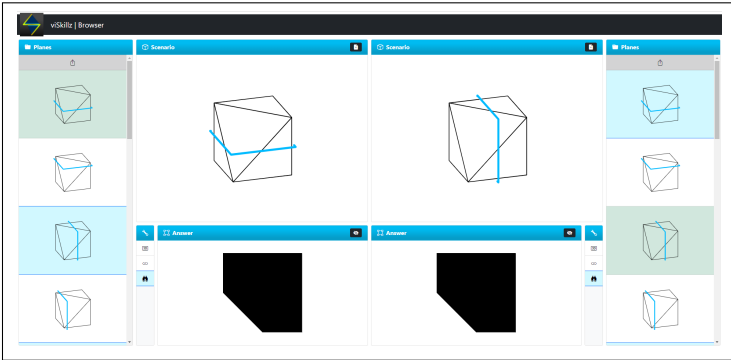


Figure 2.10: A screenshot of the *viSkillz Browser* application taken in a desktop browser.

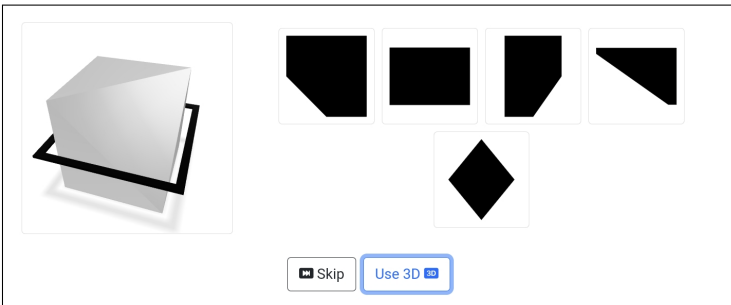


Figure 2.11: An assignment with an activated 3D viewer.

3. References

- [1] F. Alpiste Penalba, J. Torner Ribé, and M.A. Brigos Hermita. „EXPLORING VIRTUAL REALITY TO IMPROVE ENGINEERING STUDENTS’ SPATIAL ABILITIES. PILOT STUDY”. In: *EDULEARN19 Proceedings*. 11th International Conference on Education and New Learning Technologies. Palma, Spain: IATED, July 2019, pp. 6275–6284. ISBN: 978-84-09-12031-4. DOI: 10.21125/edulearn.2019.1503.
- [2] Alan J. Bishop. „Spatial abilities and mathematics education – A review”. In: *Educational Studies in Mathematics* 11.3 (Aug. 1980), pp. 257–269. ISSN: 1573-0816. DOI: 10.1007/BF00697739.
- [3] Nina Bohlmann and Ralf Benölken. „Complex Tasks: Potentials and Pitfalls”. In: *Mathematics* 8.10 (2020). ISSN: 2227-7390. DOI: 10.3390/math8101780.
- [4] CEEB. *CEEB Special Aptitude Test in Spatial Relations (MCT)*. Developed by the College Entrance Examination Board. 1939.
- [5] Francisco del Cerro Velázquez and Ginés Morales Méndez. „Application in Augmented Reality for Learning Mathematical Functions: A Study for the Development of Spatial Intelligence in Secondary Education Students”. In: *Mathematics* 9.4 (2021), p. 369. DOI: 10.3390/math9040369.
- [6] Eunhee Chang, Hyun Taek Kim, and Byounghyun Yoo. „Virtual reality sickness: A review of causes and measurements”. en. In: *Int. J. Hum. Comput. Interact.* 36.17 (2020), pp. 1658–1682. DOI: 10.1080/10447318.2020.1778351.
- [7] Yu-ching Chen. „Effect of Mobile Augmented Reality on Learning Performance, Motivation, and Math Anxiety in a Math Course”. In: *Journal of Educational Computing*

- Research* 57.7 (2019), pp. 1695–1722. DOI: 10 . 1177 / 073563311985403.
- [8] Cheryl A. Cohen and Mary Hegarty. „Inferring cross sections of 3D objects: A new spatial thinking test”. In: *Learning and Individual Differences* 22.6 (2012), pp. 868–874. ISSN: 1041-6080. DOI: 10 . 1016/j . lindif . 2012 . 05 . 007.
- [9] Merryn Cole et al. „The Relationship between Spatial Ability and the Conservation of Matter in Middle School”. In: *Education Sciences* 11.1 (2021). ISSN: 2227-7102. DOI: 10 . 3390/educsci11010004.
- [10] Anne Estapa and Larysa Nadolny. „The effect of an augmented reality enhanced mathematics lesson on student achievement and motivation”. In: *Journal of STEM education* 16.3 (2015).
- [11] Míriam Flores-Bascuñana, Pascual D Diago, Rafael Villena-Taranilla, and Dionisio F Yáñez. „On Augmented Reality for the learning of 3D-geometric contents: A preliminary exploratory study with 6-Grade primary students”. In: *Education Sciences* 10.1 (2020), p. 4. DOI: 10 . 3390 / educsci10010004.
- [12] Andri Gerber, ed. *Spatial Abilities. A Workbook for Students of Architecture*. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH, 2020. ISBN: 978-3-0356-2043-6.
- [13] R Gorska, Sheryl Sorby, and C Leopold. „Gender differences in visualization skills - An international perspective”. In: *The Engineering Design Graphics Journal* 62.3 (1998), p. 10.
- [14] Nathan W. Hartman et al. „Virtual reality-based spatial skills assessment and its role in computer graphics education”. In: *ACM SIGGRAPH'06 Proceedings*. 2006, p. 46. DOI: 10 . 1145/1179295 . 1179342.

- [15] Omar Huerta et al. „An approach to improve technical drawing using VR and AR tools”. In: *Computer-Aided Design and Applications* 17.4 (Nov. 2019), pp. 836–849. DOI: 10.14733/cadaps.2020.836-849.
- [16] Ian Lochhead, Nick Hedley, Arzu Çöltekin, and Brian Fisher. „The Immersive Mental Rotations Test: Evaluating Spatial Ability in Virtual Reality”. In: *Frontiers in Virtual Reality* (2022), p. 5. DOI: 10.3389/frvir.2022.820237.
- [17] Rita Nagy-Kondor and Saeed Esmailnia. „Polyhedrons vs. curved surfaces with mental cutting: impact of spatial ability”. In: *Acta Polytechnica Hungarica* 18.6 (2021), pp. 71–83. DOI: 10.12700/APH.18.6.2021.6.4.
- [18] B Nemeth and M Hoffmann. „Gender differences in spatial visualization among engineering students”. In: *Annales Mathematicae et Informaticae* 33 (2006), pp. 169–174. ISSN: 1787-5021.
- [19] Brigitta Németh, Csilla Sörös, and Miklós Hoffmann. „Typical mistakes in Mental Cutting Test and their consequences in gender differences”. In: *Teaching Mathematics and Computer Science* 5.2 (2007), pp. 385–392. DOI: 10.5485/TMCS.2007.0169.
- [20] Christos Papakostas, Christos Troussas, Akrivi Krouska, and Cleo Sgouropoulou. „Exploration of Augmented Reality in spatial abilities training: A systematic literature review for the last decade”. In: *Informatics in Education* 20.1 (Mar. 2021), pp. 107–130. DOI: 10.15388/infedu.2021.06.
- [21] Plamen D Petrov and Tatiana V Atanasova. „The Effect of Augmented Reality on Students’ Learning Performance in Stem Education”. In: *Information* 11.4 (2020), p. 209. DOI: 10.3390/info11040209.

- [22] Norma Presmeg. „Spatial Abilities Research as a Foundation for Visualization in Teaching and Learning Mathematics”. In: *Critical Issues in Mathematics Education: Major Contributions of Alan Bishop*. Ed. by Philip Clarkson and Norma Presmeg. Boston, MA: Springer US, 2008, pp. 83–95. ISBN: 978-0-387-09673-5. DOI: 10.1007/978-0-387-09673-5_6.
- [23] Norma Presmeg. „Visualization and Learning in Mathematics Education”. In: *Encyclopedia of Mathematics Education*. Ed. by Stephen Lerman. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 900–904. ISBN: 978-3-030-15789-0. DOI: 10.1007/978-3-030-15789-0_161.
- [24] Claudia Quaiser-Pohl. „The Mental Cutting Test "Schnitte" and the Picture Rotation Test-Two New Measures to Assess Spatial Ability”. In: *International Journal of Testing* 3.3 (Sept. 2003), pp. 219–231. DOI: 10.1207/s15327574ijt0303_2.
- [25] G. Raju, S. Sorby, and C. Reid. „INVESTIGATING THE RELATIONSHIP BETWEEN SPATIAL SKILLS AND ENGINEERING DESIGN”. In: *ICERI2022 Proceedings*. 15th annual International Conference of Education, Research and Innovation. Seville, Spain, Nov. 2022, pp. 421–426. ISBN: 978-84-09-45476-1. DOI: 10.21125/iceri.2022.0144.
- [26] Albert A Rizzo et al. „The virtual reality mental rotation spatial skills project”. In: *CyberPsychology & Behavior* 1.2 (1998), pp. 113–119.
- [27] Parviz Safadel and David White. „Effectiveness of computer-generated virtual reality (VR) in learning and teaching environments with spatial frameworks”. In: *Applied Sciences* 10.16 (2020), p. 5438. DOI: 10.3390/app10165438.

- [28] Dimitrios Saredakis et al. „Factors associated with virtual reality sickness in head-mounted displays: A systematic review and meta-analysis”. en. In: *Front. Hum. Neurosci.* 14 (2020), p. 96. DOI: 10.3389/fnhum.2020.00096.
- [29] Sheryl A. Sorby. „Educational Research in Developing 3-D Spatial Skills for Engineering Students”. In: *International Journal of Science Education* 31.3 (2009), pp. 459–480. DOI: 10.1080/09500690802595839.
- [30] Thomas Suselo, Burkhard C Wünsche, and Andrew Luxton-Reilly. „Using Mobile Augmented Reality for Teaching 3D Transformations”. In: *Proceedings of the 52nd ACM Technical Symposium on Computer Science Education*. 2021, pp. 872–878. DOI: 10.1145/3408877.3432401.
- [31] Maria Grazia Tosto et al. „Why do spatial abilities predict mathematical performance?” In: *Developmental Science* 17.3 (2014), pp. 462–470. DOI: 10.1111/desc.12138.
- [32] W. Zimmermann, S. Cunningham, and Mathematical Association of America. Committee on Computers in Mathematics Education. *Visualization in Teaching and Learning Mathematics: A Project*. MAA Notes and reports series. Mathematical Association of America, 1991. ISBN: 9780883850718.

4. List of relevant publications

Referred journal papers

- [J1] Róbert Tóth. „Script-aided generation of Mental Cutting Test exercises using Blender”. In: *Annales Mathematicae et Informaticae* 54 (2021), pp. 147–161. DOI: 10.33039/ami.2021.03.011.
- [J2] Róbert Tóth, Miklós Hoffmann, and Marianna Zichar. „Lossless Encoding of Mental Cutting Test Scenarios for Efficient Development of Spatial Skills”. In: *Education Sciences* 13.2 (2023). ISSN: 2227-7102. DOI: 10.3390/educsci13020101.
- [J3] Róbert Tóth, Bálint Tóth, Miklós Hoffmann, and Marianna Zichar. „viskillz-blender - A Python package to generate assets of Mental Cutting Test exercises using Blender”. In: *SoftwareX* 22 (2023), p. 101328. ISSN: 2352-7110. DOI: 10.1016/j.softx.2023.101328.

Papers in conference proceedings

- [I1] Róbert Tóth, Miklós Hoffmann, Márk Kósa, and Marianna Zichar. „Játékosított alkalmazások a programozási ismeretek és a térlátási képességek fejlesztésére”. In: *A 16 éves PEME XIX. PhD-Konferenciájának előadásai*. Budapest, 2019, pp. 358–365.
- [I2] Róbert Tóth, Bálint Tóth, Marianna Zichar, et al. „Detecting and Correcting Errors in Mental Cutting Test Intersections Computed with Blender”. In: *ICGG 2022 - Proceedings of the 20th International Conference on Geometry and Graphics*. Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 904–916. DOI: doi.org/10.1007/978-3-031-13588-0_79.

- [13] Róbert Tóth, Bálint Tóth, Marianna Zichar, et al. „Educational Applications to Support the Teaching and Learning of Mental Cutting Test Exercises”. In: *ICGG 2022 - Proceedings of the 20th International Conference on Geometry and Graphics*. Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 928–938. ISBN: 978-3-031-13588-0. DOI: [doi . org / 10 . 1007 / 978 - 3 - 031 - 13588 - 0 _ 81](https://doi.org/10.1007/978-3-031-13588-0_81).
- [14] Róbert Tóth, Marianna Zichar, and Miklós Hoffmann. „Gamified Mental Cutting Test for enhancing spatial skills”. In: *2020 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*. 2020, pp. 000299–000304. DOI: [10 . 1109 / CogInfoCom50765 . 2020 . 9237888](https://doi.org/10.1109/CogInfoCom50765.2020.9237888).
- [15] Róbert Tóth, Marianna Zichar, and Miklós Hoffmann. „Improving and Measuring Spatial Skills with Augmented Reality and Gamification”. In: *ICGG 2020 - Proceedings of the 19th International Conference on Geometry and Graphics*. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 755–764. DOI: [https : / / doi . org / 10 . 1007 / 978 - 3 - 030 - 63403 - 2 _ 68](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63403-2_68).

Book chapters

- [B1] Róbert Tóth and Marianna Zichar. „Augmented and Gamified Lives”. In: *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. Ed. by Newton Lee. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 1–6. ISBN: 978-3-319-08234-9. DOI: [10 . 1007 / 978 - 3 - 319 - 08234 - 9 _ 89 - 1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08234-9_89-1).

Conference talks

- [C1] Róbert Tóth, Miklós Hoffmann, Márk Kósa, and Marianna Zichar. „Motivating students’ study with ICT”. ICAI 2020 11th International Conference on Applied Informatics. Eger, 2020. URL: https://icai.uni-eszterhazy.hu/2020/abstracts/ICAI_2020_abstract_093.pdf.
- [C2] Róbert Tóth, Miklós Hoffmann, and Marianna Zichar. „viSkillz – a project dealing with Mental Cutting Test exercises”. ICAI 2023 12th International Conference on Applied Informatics. Eger, 2023. URL: https://icai.uni-eszterhazy.hu/2023/abstracts/ICAI_2023_abstract_065.pdf.



Registry number: DEENK/374/2023.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Róbert Tóth
Doctoral School: Doctoral School of Informatics
MTMT ID: 10068147

List of publications related to the dissertation

Foreign language international book chapters (1)

1. **Tóth, R.**, Bodroginé Zichar, M.: Augmented and Gamified Lives.
In: Encyclopedia of Computer Graphics and Games / Newton Lee, Springer, Cham, 1-6,
2021.

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (1)

2. **Tóth, R.**: Script-aided generation of Mental Cutting Test exercises using Blender.
Ann. Math. Inform. 54, 147-161, 2021. ISSN: 1787-5021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.33039/ami.2021.03.011>

Foreign language scientific articles in international journals (2)

3. **Tóth, R.**, Hoffmann, M., Bodroginé Zichar, M.: Lossless Encoding of Mental Cutting Test Scenarios for Efficient Development of Spatial Skills.
Educ. Sci. 13 (2), 1-21, 2023. EISSN: 2227-7102.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/educsci13020101>
IF: 3 (2022)
4. **Tóth, R.**, Tóth, B., Hoffmann, M., Bodroginé Zichar, M.: viskllz-blender - A Python package to generate assets of Mental Cutting Test exercises using Blender.
SoftwareX. 22, 1-6, 2023. ISSN: 2352-7110.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.softx.2023.101328>
IF: 3.4 (2022)

Hungarian conference proceedings (1)

5. **Tóth, R.**, Hoffmann, M., Kósa, M., Bodroginé Zichar, M.: Játékosított alkalmazások a programozási ismeretek és a térlátási képességek fejlesztésére.
In: A 16 éves PEME XIX. PhD - Konferenciájának előadásai. Szerk.: Koncz István, Szova Ilona, Professzorok az Európai Magyarorszáért Egyesület, Budapest, 358-365, 2019: ISBN: 9786155709098





Foreign language conference proceedings (4)

6. **Tóth, R.**, Tóth, B., Bodroginé Zichar, M., Fazekas, A., Hoffmann, M.: Detecting and Correcting Errors in Mental Cutting Test Intersections Computed with Blender.
In: ICGG 2022 - Proceedings of the 20th International Conference on Geometry and Graphics / Liang-Yee Cheng, Springer, Cham, 904-916, 2022. ISBN: 9783031135873
7. **Tóth, R.**, Tóth, B., Bodroginé Zichar, M., Fazekas, A., Hoffmann, M.: Educational Applications to Support the Teaching and Learning of Mental Cutting Test Exercises.
In: ICGG 2022 - Proceedings of the 20th International Conference on Geometry and Graphics / Liang-Yee Cheng, Springer, Cham, 928-938, 2022. ISBN: 9783031135873
8. **Tóth, R.**, Bodroginé Zichar, M., Hoffmann, M.: Improving and Measuring Spatial Skills with Augmented Reality and Gamification.
In: ICGG 2020 - Proceedings of the 19th International Conference on Geometry and Graphics / Liang-Yee Cheng, Springer, Cham, 755-764, 2021. ISBN: 9783030634025
9. **Tóth, R.**, Bodroginé Zichar, M., Hoffmann, M.: Gamified Mental Cutting Test for enhancing spatial skills.
In: 11th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2020) / Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), IEEE, New York, 299-304, 2020. ISBN: 9781728182148

Foreign language abstracts (2)

10. **Tóth, R.**, Hoffmann, M., Bodroginé Zichar, M.: viSkillz - a project dealing with Mental Cutting Test exercises.
In: ICAI 2023 - 12th International Conference on Applied Informatics, Eszterházy Károly Egyetem, Eger, 1-2, 2023.
11. **Tóth, R.**, Hoffmann, M., Kósa, M., Bodroginé Zichar, M.: Motivating students' study with ICT.
In: The 11th International Conference on Applied Informatics (ICAI 2020). Ed.: Fazekas István, Kovászai Gergely, Eszterházy Károly Egyetem, Eger, 1, 2020.

List of other publications

Foreign language international book chapters (1)

12. **Tóth, R.**, Kósa, M., Pánovics, J.: Automatic evaluation application for supporting database courses.
In: Education - Technology - Computer science in building better future. Szerk.: Elzbieta Salata, Agata Buda, Wydawnictwo Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu, Radom, Poland, 127-134, 2018, (Monografia, ISSN 1642-5278 ; 222.) ISBN: 9788373518605



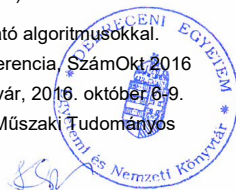


Foreign language scientific articles in international journals (1)

13. Balla, D. Z., Bodroginé Zichar, M., **Tóth, R.**, Kiss, E., Karancsi, G., Mester, T.: Geovisualization Techniques of Spatial Environmental Data Using Different Visualization Tools.
Appl. Sci.-Basel. 10 (19), 1-14, 2020. ISSN: 2076-3417.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app10196701>
IF: 2.679

Hungarian conference proceedings (6)

14. **Tóth, R.**, Kósa, M., Pánovics, J.: Programozási nyelvek oktatása a Debreceni Egyetem Informatikai Karának megújult mérnökinformatikus alapképzésén = Teaching Programming Languages in the Renewed Computer Science Engineering BSc Program at the Faculty of Informatics, University of Debrecen.
In: ENELKO 2019, SzámOkt 2019, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Temesvár, 233-238, 2019, (ISSN 1842-4546 ; 29)
15. **Tóth, R.**, Kósa, M., Kádek, T., Pánovics, J.: A ProgCont rendszer új szolgáltatásaira épülő alkalmazások = applications based on the new services of the ProgCont system.
In: ENELKO 2018 XIX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2018 XXVIII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia. Szerk.: Biró Károly-Ágoston, Sebestyén-Pál György, Szabó Loránd, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Tusnádfürdő, 331-336, 2018, (ISSN 1842-4546)
16. **Tóth, R.**, Kádek, T., Kósa, M., Pánovics, J.: Kiértékeléssel kapcsolatos informatikai fejlesztések a Debreceni Egyetem Informatikai Karán.
In: A 15 éves PEME XVII. PhD-Konferenciájának előadásai. Szerk.: Koncz István, Szova Ilona, Professzorok az Európai Magyarorszáért Egyesület, Budapest, 160-171, 2018. ISBN: 9786155709050
17. **Tóth, R.**, Kósa, M., Kádek, T., Pánovics, J.: A programozástanulás játékosítása = learning programming through gamification.
In: ENELKO 2017 XVIII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2017 XXVII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Kolozsvár, 2017. október 12-15. Szerk.: Biró Károly-Ágoston, Sebestyén-Pál György, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Cluj-Napoca, 230-235, 2017, (ISSN 1842-4546)
18. **Tóth, R.**, Kádek, T., Kósa, M., Pánovics, J.: Feladatajánlás döntéstámogató algoritmusokkal.
In: ENELKO 2016 XVII. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2016 XXVI. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Kolozsvár, 2016. október 6-9. Szerk.: Biró Károly-Ágoston, Sebestyén-Pál György, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Cluj-Napoca, 300-305, 2016, (ISSN 1842-4546)





19. **Tóth, R.**, Kósa, M., Kádek, T., Pánovics, J.: ProgContR: mentor alkalmazás a SmartCampusban.
In: ENELKO 2015 XVI. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia, SzámOkt 2015 XXV. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Arad, 2015. október 8-11.
Szerk.: Biró Károly-Ágoston, Sebestyén-Pál György, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Cluj-Napoca, 328-333, 2015, (ISSN 1842-4546)

Foreign language conference proceedings (4)

20. Balla, D. Z., Bodroginé Zichar, M., **Tóth, R.**, Kiss, E., Karancsi, G., Lázár, V., Baranyi, I., Mester, T.: Visualization of Water Quality Index using Keyhole Markup Language.
In: LXII. Georgikon Napok konferenciakötet : A klímaváltozás kihívásai a következő évtizedekben. Szerk.: Lukács Gábor, Szanati Angéla, Szent István Egyetem, Georgikon Kar, Keszthely, 1-6, 2021. ISBN: 9789632699424
21. **Tóth, R.**, Balla, D. Z., Bodroginé Zichar, M.: Analysis and Optimization of KML Files.
In: INTED2020 : conference proceedings / L. Gómez Chova, A. López Martínez, I. Candel Torres, IATED Academy, Valencia, 4209-4216, 2020, (INTED Proceedings, ISSN 2340-1079) ISBN: 9788409179398
22. **Tóth, R.**, Kósa, M., Kádek, T., Pánovics, J.: The Development of Evaluation Systems at the Faculty of Informatics, University of Debrecen.
In: INTED2019 13th International Technology, Education and Development Conference : conference proceedings / L. Gómez Chova, A. López Martínez, I. Candel Torres, IATED Academy, Valencia, Spain, 5552-5559, 2019, (ISSN 2340-1079) ISBN: 9788409086191
23. Adamkó, A., Kádek, T., Kollár, L., Kósa, M., **Tóth, R.**: Cluster and discover services in the smart campus platform for online programming contests.
In: 6th IEEE Conference on Cognitive Infocommunications CogInfoCom 2015 : Proceedings, October 19-21, 2015, Széchenyi István University Győr, Hungary, IEEE, Danvers, 385-389, 2015. ISBN: 9781467381291

Foreign language abstracts (1)

24. Balla, D. Z., Bodroginé Zichar, M., **Tóth, R.**, Kiss, E., Karancsi, G., Lázár, V., Baranyi, I., Mester, T.: Visualization of Water Quality Index using Keyhole Markup Language.
In: A klímaváltozás kihívásai a következő évtizedekben : 62. Georgikon Napok : Előadások kivonatai, Szent István Egyetem Georgikon Kar, Keszthely, 12, 2020.

Total IF of journals (all publications): 9,079

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 6,4

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

17 August, 2023

