

OPTIMALIZACE ROZMÍSTĚNÍ KAMER PRO BUDOUCÍ IMAGE PROCESSING

Ing. Václav Wudi, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební
České vysoké učení technické v Praze, Tháškova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
vaclav.wudi@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento článek se věnuje optimalizaci rozložení kamer pro následnou obrazovou analýzu. Optimalizace byla provedena na konstrukci hyperbolického paraboloidu. Stanovují se zde podmínky, které musí být splněny tak, aby kamera zabírala příslušnou plochu po celou dobu zatěžování. Výpočet byl vzhledem k následným možným metodám zpracování obrazu proveden na případech, kdy libovolný bod na konstrukci musí být zabírán z jedné, nebo z dvou kamer. Cílem bylo dosáhnout co nejlepšího rozvržení kamer tak, aby byly co nejbližší k konstrukci, ale zároveň zabíraly celou plochu konstrukce. Optimalizace byla provedena genetickým algoritmem. Každá kamera je zde popsána 6 parametry. Optimalizační výpočet je proveden pro 3,4 a 5 kamer.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optimalizace • Genetické algoritmy • Obrazová analýza • Automatizace konstrukce

ABSTRACT

This paper focuses on the optimization of camera distribution for image analysis. The optimization was performed on a hyperbolic paraboloid membrane. We define the conditions that must be satisfied so that the camera scan the appropriate area throughout the loading period. Due to the possible image processing methods, the calculation was performed on cases where both one and two cameras have to scan this point. The aim was to achieve the best possible distribution of the cameras so that they were as close as possible to the structure, but at the same time scan the entire surface of the structure. The optimization was performed by genetic algorithms. Each camera is described here with 6 parameters. The optimization calculation is done for 3,4 and 5 cameras.

KEYWORDS

Optimization • Genetic Algorithm • Image processing • Automation of construction

1. ÚVOD

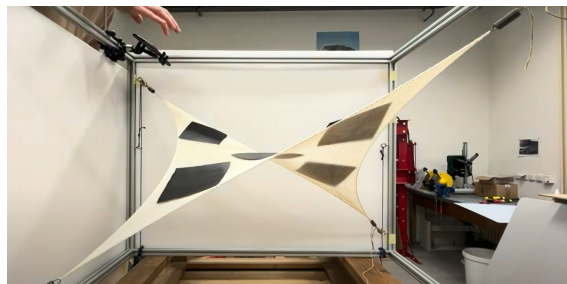
Pro efektivní rozhodnutí je třeba správná data ve správném množství. Pro rozhodnutí ve stavebnictví to platí také. Pokud má docházet k automatizaci a robotizaci stavebnictví, platí to zrovna tak. Jedním druhem dat jsou data obrazová. Jsou to data z kamer a videa.

Tento článek má za cíl najít co nejlepší rozložení kamer pro následné snímání stavu konstrukce. Čím blíže kameru přiblížíme

k části konstrukce, tím získáme přesnější obraz. Zároveň se snižující vzdáleností snižuje také plocha, kterou kamera snímá. Kamery mají svoje náklady, tedy jich nelze dát nekonečně mnoho.

Snažíme se umístit kamery tak, aby každý bod konstrukce, případně kontrolované body byly snímány minimálně dvěma kamerami. To zajistí zachycení deformací. Další možností je snímání jen jednou kamerou na každý bod a následné zachycení deformace kolmé ke směru snímání.

V tomto příspěvku tuto úlohu řešíme na příkladu pleteného bednění, které je postupně zatěžováno. Pletené bednění s rámem zaobírá prostor krychle zhruba metru. Samotné pletené bednění je tvaru hyperbolického paraboloidu (viz 1).



Obrázek 1: Pletené bednění hyperbolického paraboloidu.

Tento případ je zvolen vzhledem k tomu, že konstrukce prochází prostorem vertikálně a svisle a zároveň jde popsat matematicky jednou funkcí. Vzhledem k malé velikosti rozměrů nejsme omezení výškou a lze umístit kamery téměř libovolně.

Prvním krokem bylo vytvořit kritéria, která určí, zda je bod zachycen do snímku anebo nikoliv. Dalším krokem je provedení optimalizace. Jsou zvoleny genetický algoritmus. Posledním krokem je vyhodnocení řešení.

2. KAMERA A KRITÉRIA

Digitální kamera je běžně definována polohou čočky a objektivu, velikostí zorného pole ve dvou směrech (x,y) a rozlišení (viz Farrell et al. (2012)).

Konstrukce, kterou chceme snímat se na začátku rozdělí na několik bodů. Mělo by se jednat především o ty body, jejich deformace je pro nás podstatná pro další výpočet. Jedná se o pomyslnou síť.

Podmínkami pro posouzení, zda je bod v záběru kamery jsou dva. První podmínka je jestli je bod v záběru kamery. Druhým je jestli před bodem není nějaký objekt, který by ho zastiňoval a bránil tím pohledu na příslušný bod. Pro porušení první podmínky

* Supervisor: prof. Ing. Petr Štemberk, Ph.D., D.Eng.

by musel být bod příliš daleko, příliš blízko (obtížné zaostření) anebo mimo zorný úhel kamery. Vzdálenost bodu od kamery lze získat:

$$d = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2} \quad (1)$$

kde δ_i je rozdíl v příslušné souřadnici i . Podmínka je tedy

$$d_{min} < d < d_{max} \quad (2)$$

Hodnota d_{max} vychází z hodnot rozlišení fotoaparátu (přesněji rozlišení fotoaparátu a úhlu záběru) a také požadované přesnosti.

Podmínka pro posouzení zorného úhlu se získá z přímkou vedoucí kolmo na objektiv a spojnice bodu a čočky. Pokud budeme předpokládat, že poloha se nemůže natáčet vzhledem k ose kamery, tak lze úhel zjistit odchylkou přímek. Pokud budeme předpokládat, že se kamera může natáčet k příslušné ose, tak je výpočet složitější. Podmínka je:

$$\begin{aligned} \delta_{xyall} &= -(-\delta_z + \delta_x \alpha_x + \delta_y \alpha_y) \\ d_{lim} &= \sqrt{(X + \alpha_x \delta_{xyall})^2 + (Y + \alpha_y \delta_{xyall})^2} \end{aligned} \quad (3)$$

Kde X a Y znázorňují souřadnice kamery. Z úhlů α_{minx} a α_{miny} , které vyjadřují rozsah kamery, můžeme získat limitní vzdálenosti od osy kamery v místě řešeném bodu:

$$\begin{aligned} d_{limx} &= d_{lim} \tan(\alpha_{minx}) \\ d_{limy} &= d_{lim} \tan(\alpha_{miny}) \end{aligned} \quad (4)$$

Následně získáme vzdálenost bodů od osy.

$$\begin{aligned} X_{conv} &= \sqrt{(\delta_x - \alpha_x \delta_{xyall})^2 + (\delta_z - \delta_{xyall})^2} \\ Y_{conv} &= \sqrt{\delta_y - \alpha_y \delta_{xyall})^2 + (\delta_z - \delta_{xyall})^2} \end{aligned} \quad (5)$$

Následně zohledníme rotaci kolem osy kamery z úhlu natočení α_{xy} .

$$\begin{aligned} X_{real} &= X_{conv} \cos(\alpha_{xy}) + Y_{conv} \sin(\alpha_{xy}) \\ Y_{real} &= X_{conv} \sin(\alpha_{xy}) - Y_{conv} \cos(\alpha_{xy}) \end{aligned} \quad (6)$$

Následná podmínky jsou:

$$\begin{aligned} X_{real} &< d_{limx} \\ Y_{real} &< d_{limy} \end{aligned} \quad (7)$$

Vzhledem k tomu že měříme deformace, tak by se mohlo stát, že bod bude zachycen, ale v průběhu měření již tato podmínka splněna nebude. Podmínku je vhodné tedy řešit jak pro bod v počáteční poloze, tak pro místa, kam až může deformace zasahovat¹.

Pro podmínku nezastínění záběru se vytvoří úsečka spojující daný bod a kameru. Podmínka je splněna pokud žádná plocha, která vstupuje do výpočtu neprotíná úsečku. Pro hyperbolický paraboloid lze tuto podmínku vyjádřit kvadratickou rovnicí:

$$\begin{aligned} Ax^2 + Bx + C &= 0 \\ A &= \left(\frac{\delta_x^2 + \delta_y^2}{2} \right) ab^- + \delta_y \delta_x ab^+ \\ B &= \left(\delta_x C_x + \delta_y C_y \right) ab^- + \left(\delta_x C_y + \delta_y C_x \right) ab^+ - \delta_z \\ C &= \left(\frac{C_x^2 + C_y^2}{2} \right) ab^- + C_x C_y ab^+ - \delta_z \end{aligned} \quad (8)$$

Kde δ_x , δ_y a δ_z jsou rozdíly souřadnic mezi ohniskem kamery a měřeného bodu. Proměnné C_x a C_y jsou souřadnice kamery. Hodnoty ab^+ a ab^- se vyjádří následovně:

$$\begin{aligned} ab^+ &= \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \\ ab^- &= \frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \end{aligned} \quad (9)$$

kde a , b jsou parametry používané pro funkci hyperbolického paraboloidu.

Postupuje podle dvou možností následného zpracování obrazu a s ním i vyhodnocení podmínek pro dané body na konstrukci. Ve zjednodušeném zpracování. Pro vyhodnocení se použije koeficient zaplněnosti, kdy se vypočte z poměru viditelných bodů ku celkovému počtu bodů.

3. OPTIMALIZACE

Pro provedení byl zvolen genetický algoritmus. Genetické algoritmy jsou evoluční algoritmy (viz Mathew (2012)). Postupně se vytváří lepší a lepší skupina řešení. Na začátku se vytvoří náhodně první generace (skupina) řešení. Tato řešení se ohodnotí fitness funkcí. Ta se odvíjí od kritéria, které chceme optimalizovat.

Následně proběhne selekce při níž se vyberou jedinci, z nich budou vytvořeni noví jedinci. Kombinováním parametrů (křížením jedinců) vybraných jedinců vytvoříme novou generaci (viz Umbarakar & Sheth (2015)). Poté proběhne mutace, tedy změna určitých parametrů s malou pravděpodobností (viz De Falco et al. (2002)).

Celý tento cyklus probíhá dokud není splněn, předem daný počet generací, nebo požadovaná fitness funkce.

4. APLIKACE

4.1. Způsob výpočtu

Výpočet byl proveden pomocí programu vytvořeného v programovacím jazyce Python. Python je programovací jazyk (viz Python (2021)). Výpočet byl proveden opakovaně pro 200 generací výpočtu.

4.2. Výhled kamery

Výpočet byl proveden jak pro variantu kdy na všechny body musí být zabírán ze dvou kamer, tak pro záběr z jedné kamery. Výpočet byl proveden pro 3, 4 a 5 kamer pro oba případy. Tedy jak případ, kdy musí být na body konstrukce vidět minimálně z jedné kamery, tak případ kdy musí být na body konstrukce vidět minimálně ze dvou kamer.

4.3. Optimalizace

Fitness funkce je závislá na přesnosti hodnot, kterou získáme z vzdálenosti kamery. Přesnost je nepřímo úměrná vzdálenosti kamery, která ho snímá.

Nejdříve se spočítá pomocná hodnota fitness pro každý bod v síti. Fitness funkce je průměrem daných hodnot. Pokud je u některého bodu koeficient zaplnění roven nule, tak je fitness funkce daného bodu je rovna nule.

$$f = 1 - \frac{d_0}{d_{max}} \quad (10)$$

kde d_0 je vzdálenost bodu k nejbližší kameře, d_{max} je maximální vzdálenost.

¹To je rovnicí vyjádřeno posunutím hyperbolického paraboloidu v podmínice zobrazení pohledu.

Jakékoliv řešení si lze představit jako vektor hodnot o velikosti $6n$, kde n je počet kamer. Vzhledem k tomu, že se jedná o hledání poloh v prostoru mohlo by dojít k záměně kamer. Je tedy potřeba zamezit záměně (prohození) kamer v daném vektoru. To je provedeno seřazením kamer.

Seřazení kamer se provádí tak, že se jako první kamera, která vstupuje do vektoru bere ta s nejmenší x souřadnicí. Pokud jsou tyto souřadnice stejné tak Y souřadnicí atd.

4.4. Vstupní parametry

Pro vstup do výpočtů byly zvoleny následující parametry. Hyperbolický paraboloid je dán funkcí:

$$z = z_0 + \frac{x}{a^2} - \frac{y}{b^2} \quad (11)$$

kde parametry jsou zvoleny $a = b = 8$, $z_0 = 20^2$. Jednotky jsou v cm. Rozměry jsou omezeny pro x a y v rozsahu.

$$-50 < x < 50 \quad (12)$$

$$-50 < y < 50 \quad (13)$$

Parametry kamery byly zvoleny ³ úhlem rozsahu záběru kamery:

$$\begin{aligned} \alpha_x &< 90 \\ \alpha_y &< 90 \end{aligned} \quad (14)$$

Požadovaná přesnost byla stanovena na jednotky milimetrů. Tedy tak, že pixel může odpovídat maximálně hodnotě milimetru.

Z tohoto parametru je odvozena maximální vzdálenost:

$$d < 250 \text{ mm} \quad (15)$$

4.5. Definování kamery

Každá kamera je definována šesti parametry. První tři body přísluší souřadnicím X , Y a Z . Další dva body jsou vyjádření úhlu, tedy koeficienty parametrického vyjádření sklonu přímky. Poslední bod je rotace kamery kolem přímky, která definuje její pohled.

Je definováno, že ohnisko kamera nemůže být v těsné blízkosti konstrukce pleteniny. V tomto případě by konstrukce kamery překrývala zatěžovanou konstrukci.

Přímka pohledu (úhly pohledu kamery) je definována dvěma hodnotami, které určují parametrické vyjádření přímky a jednu hodnotu, která určuje natočení kamery, kdy nulová hodnota značí svislou polohu pohledu kamery.

5. VÝSLEDKY

V této kapitole jsou představeny výsledky. Číselné hodnoty jsou v tabulkách a znázornění je provedeno na obrázcích. Hyperbolický paraboloid je pro každý výsledek natočený, aby bylo jasné vidět umístění kamer.

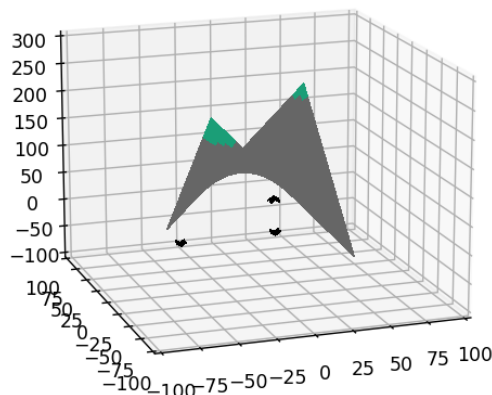
Malé černé body značí polohu umístění kamer. Je u nich naznačen směr pohledu. Zelené plochy značí nízkou fitness funkci bodu. Nemusí se nutně jednat body, které nejsou v záběru, ale mohou být jen dostatečně daleko od všech kamer.

²Na hodnotě zvolení z_0 v podstatě nezáleží, jen se posune hyperbolický paraboloid posune nahoru a nebo dolů.

³Pokud bychom postupovali při optimalizaci opravdu důkladně, samotná volba kamery by mohla být jedním s parametru.

5.1. Pohled na bod jednu kameru pro 3 kamery

Pro rozmístění (polohy a natočení) tří kamer, kdy každý bod musí být snímán minimálně z jedné kamery, je řešení následující: (viz obr. 2, tab. 1)



Obrázek 2: Řešení pro tři kamery.

Kamera	X	Y	Z	a_x	a_y	α_z
1	-52.02	7.46	-27.85	-2.5	-8.7	108.5
2	-11.32	-57.37	100.06	11.4	3.8	-21.7
3	11.41	3.8	-21.7	100	-303.5	3.8

Tabulka 1: Číselné výsledky pro tři kamery

Všechny tři kamery jsou umístěny pod spodním okrajem konstrukce. První kamera je umístěna u spodního (levého) rohu konstrukce. Směřuje nahoru a snímá spodní roh a část středu konstrukce. Druhá kamera snímá druhý spodní (pravý) roh konstrukce. Třetí kamera snímá střed konstrukce.

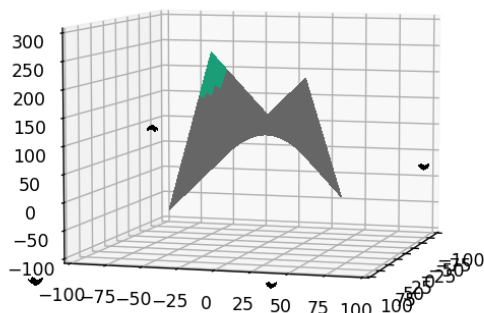
5.2. Pohled na bod jednou kamerou pro 4 kamery

Pro rozmístění (polohy a natočení) čtyř kamer, kdy každý bod musí být snímán minimálně z jedné kamery, je řešení následující: (viz obr. 3, tab.2)

Kamera	X	Y	Z	a_x	a_y	α_z
1	-30.60	0.06	-198.31	-8.3	-26.4	3.0
2	-5.61	115.23	44.29	-5.2	404.3	-7
3	12.02	-73.35	115.23	12.0	-5.6	115.2
4	404.35	-7.01	-5.22	413.8	-7	-14.3

Tabulka 2: Číselné výsledky pro čtyři kamery

Jedna kamera snímá konstrukci ze spodní části, další tři ze tří různých stran konstrukce. Kamery snímají celou plochu hyperbolického paraboloidu. První kamera snímá střed hyperbolického paraboloidu. Druhá kamera snímá konstrukci z boku, zabírá celou jednu hranu (od spodního k dolnímu rohu) a přilehlou oblast. Třetí kamera snímá také ze strany, zabírá protilehlou hranu oproti předchozí kameře. Čtvrtá kamera snímá spodní roh hyperbolického paraboloidu.



Obrázek 3: Řešení pro čtyři kamery.

5.3. Pohled na bod jednu kameru pro 5 kamer

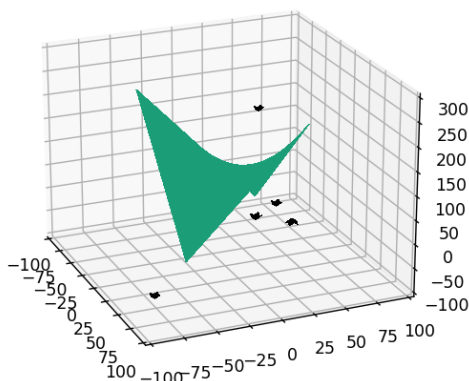
Pro rozmístění (polohy a natočení) pět kamer, kdy každý bod musí být snímán minimálně z jedné kamery, je řešení následující: (viz obr. 7, tab.3)

Kamera	X	Y	Z	a_x	a_y	α_z
1	-179.51	105.92	18.89	138.4	-7.1	134
2	-66.33	-30.76	-239.44	-80	-161	53
3	-18.72	49.91	-19.56	-179.3	-19.6	-180
4	87.9	-13.99	87.9	-13	87.9	-19
5	133.46	-7.12	133.46	5.9	133.5	-293

Tabulka 3: Číselné výsledky pro pět kamer

Z pěti kamer jsou čtyři ze spodní části a jedna z boční části konstrukce. Kamery snímají celou plochu hyperbolického paraboloidu.

První kamera snímá ze spodní části. Snímá především střed konstrukce. Druhá kamera snímá ze spodní části dolní roh konstrukce. Třetí kamera snímá dolní roh konstrukce. Čtvrtá kamera snímá střed konstrukce a horní roh konstrukce. Pátá kamera snímá z boku horní rohy hyperbolického paraboloidu.



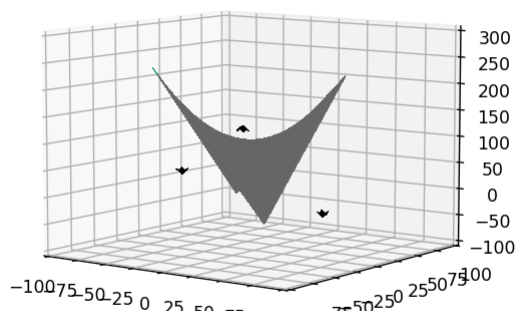
Obrázek 4: Řešení pro pět kamer.

5.4. Pohled z dvou kamer pro 3 kamery

Pro rozmístění (polohy a natočení) tří kamer, kdy každý bod musí být snímán minimálně ze dvou kamer, je řešení následující: (viz obr. 5, tab. 4)

Kamera	X	Y	Z	a_x	a_y	α_z
1	-43.98	-25.16	34.52	27.7	-42.4	138
2	20.6	-40.11	142.91	44.6	20.6	-40.1
3	44.56	20.6	-40.11	-60.9	-274.4	21.4

Tabulka 4: Číselné výsledky pro tři kamery



Obrázek 5: Řešení pro tři kamery.

Ze tří kamer jsou dvě spodní a jedna horní. Horní kamera snímá střed paraboloidu. Horní a dolní rohy hyperbolického paraboloidu nejsou v obrazu snímání žádné, nebo jen jedné kamery.

První kamera snímá střed a horní roh konstrukce. Druhá kamera snímá především střed konstrukce pohledem z hora. Třetí kamera snímá horní (praví) roh konstrukce.

5.5. Pohled z dvou kamer pro 4 kamery

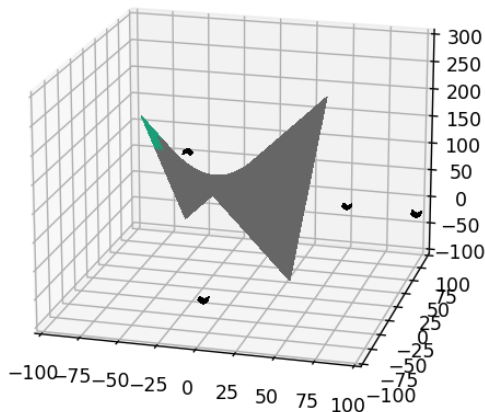
Pro rozmístění (polohy a natočení) čtyř kamer, kdy každý bod musí být snímán minimálně ze dvou kamer, je řešení následující: (viz 6, tab. 5).

Kamera	X	Y	Z	a_x	a_y	α_z
1	6.32	-108.83	-21.96	17.5	-23.1	7
2	-48.07	46.47	103.35	-48.1	69.6	103
3	45.32	109.6	-44.69	21.2	109.6	29
4	109.6	28.62	28.1	87	-54.2	7

Tabulka 5: Číselné výsledky pro čtyři kamery

Dvě ze čtyř kamer snímají konstrukci ze strany. Jedna kamera snímá konstrukci ze spodní části a jedna z horní.

První kamera snímá konstrukci ze zdola, zabírá především střed konstrukce a okrajově i praví dolní roh. Druhá kamera zabírá konstrukci ze strany. Zabírá střed a dolní roh. Třetí kamera zabírá z druhé (levé) strany horní i dolní roh. Čtvrtá kamera snímá konstrukci šikmo zdola. Zabírá oba dolní rohy konstrukce a jeden horní.



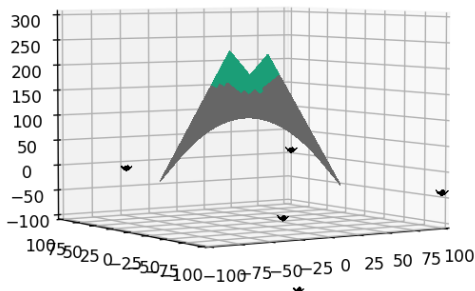
Obrázek 6: Řešení pro čtyři kamery.

5.6. Pohled z dvou kamer pro 5 kamer

Pro rozmístění (polohy a natočení) pěti kamer, kdy každý bod musí být snímán minimálně ze dvou kamer, je řešení následující: (viz 7, tab. 6).

Kamera	X	Y	Z	α_x	α_y	α_z
1	-86.98	31.94	0.37	276.5	0.4	45
2	1.18	-41.81	-93.24	1.2	-238.8	35
3	7.31	-221.05	-5.43	-29.3	100.6	-29
4	29.64	-10.21	29.64	-10.2	-134.7	-87
5	45.34	3.05	-256.91	3	-221	7.3

Tabulka 6: Číselné výsledky pro pět kamer.

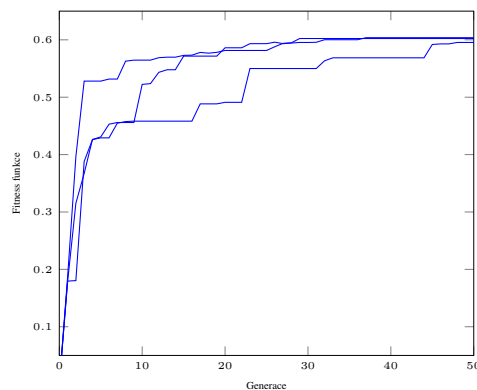


Obrázek 7: Řešení pro pět kamer.

Tři z pěti kamer snímají konstrukci ze spodní části. Pokaždé z jiné vzdálenosti. Dvě ji snímají ze stran. První kamera snímá střed konstrukce. Druhá a třetí kamera snímají střed a spodní hory. Čtvrtá a pátá kamera snímají hrany a horní rohy, každá z jiné strany.

5.7. Průběhy fitness funkcí

Zde je uveden (viz obr. 8) průběh fitness funkce pro 3 kamery. Průběh je vykreslen pro tři výpočty.



Obrázek 8: Průběh fitness funkce.

6. DISKUZE

Byl proveden výpočet pro 3, 4 a 5 kamer, pro oba typy snímání.

Fitness funkce postupně nabývá což značí, že výsledek se postupně zlepšuje. U většiny řešení převládá umístění z dolní části konstrukce. To může být zapříčiněno možným rozsahem umístění kamer, případně tvarem konstrukce.

Při opakovaném výpočtu docházíme k obdobným řešením. To značí, že výpočet konverguje k řešení. Pro příklady obsahující tři kamery, nebylo nalezené takové řešení, které by umožnilo snímání celou plochu hyperbolického paraboloidu.

7. ZÁVĚR

Výpočet určení byl proveden na jednoduché konstrukci hyperbolického paraboloidu. Směr práce by bylo možné přenést z zkoušky prováděné v interiéru na příklady reálné konstrukce stavby. Zde by bylo nutné provést některá rozšíření.

Bylo by potřeba rozšířit množství objektů, které mohou pohledu kamery bránit a zároveň zúžit relativní množství bodů, které snímáme, tak aby úloha byla časově řešitelná. Zároveň by bylo vhodné zohlednit manipulační prostor na stavbě, tak aby kamera do něho nezasahovala. Nelze ani opomenout vliv stínu od kamer. Při případném rozšíření problému by se nemuselo jednat jen o optimalizaci kamer, ale i optimalizaci osvětlení.

Poděkování

Tento článek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS24/041/OHK1/1T/11

Reference

- De Falco, I., Della Cioppa, A. & Tarantino, E. (2002), 'Mutation-based genetic algorithm: performance evaluation', *Applied Soft Computing* **1**(4), 285–299.
- Farrell, J. E., Catrysse, P. B. & Wandell, B. A. (2012), 'Digital camera simulation', *Applied optics* **51**(4), A80–A90.
- Mathew, T. V. (2012), 'Genetic algorithm', *Report submitted at IIT Bombay* p. 53.
- Python, W. (2021), 'Python', *Python Releases for Windows* **24**.
- Umbarkar, A. J. & Sheth, P. D. (2015), 'Crossover operators in genetic algorithms: a review.', *ICTACT journal on soft computing* **6**(1).