

Dokumentowanie zabytkowych fresków z wykorzystaniem fotogrametrii cyfrowej

streszczenie

Odnowa zabytkowych fresków zazwyczaj poprzedzona jest opracowaniem metrycznej dokumentacji stanu zachowania. Dokumentacja taka pokazuje stan malowidła przed konserwacją i może służyć do dalszych badań i analiz nad sposobem zachowania wartości dzieła.

Dokumentacja metryczna może być sporządzona metodą bezpośrednich pomiarów lub metodą fotogrametryczną. Z punktu widzenia kształtu powierzchni możemy wyróżnić freski namalowane na: powierzchniach płaskich, powierzchniach niepłaskich ale rozwijalnych (np. walec, stożek) i powierzchniach nierozwijalnych (np. sfera, lub inne nieregularne powierzchnie). W zależności od kształtu powierzchni można sporządzić plan malowidła w jednolitej lub niejednolitej skali. Plany sporządzone w jednolitej skali dla malowideł zlokalizowanych na powierzchniach rozwijalnych jak walec czy stożek można nazwać rozwinięciami. Drugi rodzaj planów, sporządzanych w niejednolitej skali, będzie wykonany w przyjętym odwzorowaniu kartograficznym.

Sporządzenie dokumentacji fresku obejmuje dwa etapy. W pierwszym mierzony jest kształt powierzchni oraz wybrany jest odpowiedni rodzaj projekcji na płaszczyznę odniesienia, który możemy nazwać ustaleniem zasad rozwinięcia malowidła ściennego. W drugim etapie treść malowidła przenoszona jest na plan stanowiący metryczną dokumentację.

Sklepienia, na których często umieszczone są malowidła, są na ogół projektowane jako powierzchnie regularne. Jednakże ich rzeczywisty kształt, ze względu na wiele czynników (np. deformacje budowli, sklepienia), może różnić się od kształtu projektowanego. Aby w sposób poprawny zrekonstruować geometrię aktualnego stanu sklepienia możliwe są dwa podejścia: opisać powierzchnię zbiorem regularnie lub nieregularnie rozmieszczonych punktów, albo aproksymować powierzchnię funkcją matematyczną. Gęstość punktów na powierzchni zależy od regularności sklepienia i ma wpływ na dokładność opracowanego rozwinięcia. Zbiór punktów na powierzchni sklepienia możemy nazwać Numerycznym Modelem Sklepienia (NMS). Punkty te mogą być połączone w sieć nieregularnych trójkątów i wykorzystane bezpośrednio do określenia przekrojów. Można również w pierw wyinterpolować regularną siatkę punktów 3D. W obu przypadkach można obliczyć długość dowolnego przekroju sklepienia. Odległości w przekrojach prostopadłych do osi walca stanowią jedną z współrzędnych ortogonalnego układu rozwinięcia. Inną możliwością jest matematyczny opis kształtu sklepienia na podstawie reprezentatywnego zbioru punktów usytuowanych na powierzchni sklepienia. Przyjmuje się, że punkty zrzutowane są prostopadle do powierzchni matematycznej. Dokładność aproksymacji powierzchni określona jest przez odległość powierzchni rzeczywistej i matematycznej oraz, co jest ważniejsze, wpływ tego odstępstwa na położenie punktu na obrazie fotograficznym. Zależy on od różnicy kierunku prostopadłego do powierzchni a kierunku promienia rzutującego punkt na zdjęcie. Te błędy perspektywiczne mogą być dość duże, gdy używa się kamer szerokokątnych lub lokalizacja i orientacja kamery nie jest optymalna.

Błędy perspektywiczne można zmniejszyć: korzystając z kamer wąskokątnych, optymalizując lokalizację stanowisk kamer, zmniejszając odległość pomiędzy powierzchnią rzeczywistą i matematyczną (można to uzyskać wybierając kilka powierzchni aproksymujących dla mniejszych fragmentów sklepienia) lub stosując specjalną projekcję matematyczną.

Kolejnym etapem jest przeniesienie malowidła ze zdjęcia na plan (rozwiniecie). W przypadku opracowywania mapy kreskowej wymaga to digitalizacji treści malowidła i transformacji do układu rozwinięcia. Jeśli dokumentacja sporządzana jest w postaci fotoplanu wymaga to powtórnego próbkowania (resamplingu) zdjęcia oryginalnego. Najczęściej stosowaną i najprostszą metodą jest niezależna transformacja częściami, na które dzielimy obraz. Można rozważać użycie różnych formuł transformacyjnych dla poszczególnych części malowidła. Czym bardziej złożona formuła, tym może obejmować ona większą powierzchnię, jednakże wymagać to będzie większej liczby punktów dostosowania, ale zmniejszy długość linii styku co ułatwia uzyskanie jednorodnego kolorystycznie fotoplanu. Istnieje kilka komercyjnych programów, które umożliwiają automatyczną generację trójkątów (TIN) z punktów dostosowania mierzonych na sklepieniu i przetworzonym obrazie. Metoda ta powoduje jednak pewne zniekształcenia na granicach obszaru. Punkty dostosowania powinny być jednoznacznie zidentyfikowane przez operatora na sklepieniu i na obrazie, co jest czynnością bardzo pracochłonną. Utworzenie trójkątów powinno odbywać się również pod kontrolą operatora.

Dla określenia kształtu sklepienia obejmującego duże powierzchnie, czasami jest łatwiej wykorzystać zdjęcia wykonane szerokokątną kamerą fotogrametryczną (np. UMK 10/1318) niż opracowywać blok zbudowany z niemetrycznych zdjęć średniego formatu. W przeprowadzonych przez nas pracach stwierdziliśmy, że najbardziej odpowiednie do rejestracji w kolorze malowidła są zdjęcia stereoskopowe wykonane aparatem niemetrycznym na format 6x6. Zdjęcia takie mogą być również wykorzystane do określenia kształtu sklepienia. Współrzędne punktów dostosowania niezbędnych do przekształcenia zdjęcia kolorowego można określić na podstawie pomiarów na stereogramach zdjęć metrycznych. Relacja pomiędzy stereoparami zdjęć niemetrycznych a przestrzenią obiektu może być określona za pomocą funkcji DLT (bezpośrednia transformacja liniowa).

Nowoczesna fotogrametryczna technologia opracowywania rozwinięć oparta jest na metodach fotogrametrii cyfrowej, wykorzystującej do pomiaru na zdjęciach metrycznych i niemetrycznych cyfrową stację fotogrametryczną. Do wyżej wymienionych pomiarów wykorzystano VSD (Video Stereo Digitizer) skonstruowany na AGH. Umożliwia on realizację klasycznej 3 etapowej orientacji dla zdjęć metrycznych lub orientację opartą na transformacji DLT dla stereogramów lub pojedynczych zdjęć niemetrycznych.

Dla celów konserwacji sporządzono w ostatnich latach dokumentację kilku malowideł usytuowanych na sklepieniu kościołów. Założono, że produkt końcowy, którym były fotomozajki charakteryzuje się dokładnością graficzną < 0.5 mm. Zdjęcia kolorowe wykonywane były aparatami 6x6 lub małoobrazkowymi a następnie konwertowane do postaci cyfrowej drogą skanowania z rozdzielczością 2000 dpi. Stosowano trzy następujące sposoby określania współrzędnych punktów definiujących powierzchnię sklepienia i punktów dostosowania dla transformacji TIN:

1. Punkty kontrolne (identyfikowane na niemetrycznych zdjęciach kolorowych dla transformacji DLT) oraz punkty definiujące kształt sklepienia mierzono metodami geodezyjnymi, punkty niezbędne do przetwarzania zdjęć mierzono na zdjęciach niemetrycznych, (Kościół Pijarów w Krakowie),
2. Kształt obiektu określono na podstawie pomiarów wykonanych na stereogramach zdjęć metrycznych (UMK 10/1318). Punkty dostosowania dla transformacji TIN były identyfikowane i mierzone na powyższych stereogramach (Stecometer) oraz zdjęciach kolorowych (VSD-AGH), (Biblioteka Opactwa Cystersów w Lubiążu),
3. Punkty definiujące kształt obiektu oraz punkty dostosowania dla transformacji TIN były mierzone na stereogramach zdjęć niemetrycznych, punkty kontrolne dla transformacji DLT określono z stereogramu czarno-białych zdjęć metrycznych.

Schemat blokowy stosowanych technologii pokazano na rys. 1. a przykłady wykonanych opracowań na rys. 2,3,4.

REPRESENTATION OF HISTORICAL FRESCOS USING DIGITAL PHOTOGRAMMETRY

Prof. Dr Józef Jachimski

Dr Władysław Mierzwa

Department of Photogrammetry and Remote Sensing Informatics

University of Mining and Metallurgy, Cracow

e-mail: jjachim@uci.agh.edu.pl

KEYWORDS: heritage preservation, digital photogrammetry, non-metric photos, photomosaicing, surface development

ABSTRACT

The technology for documentation of historical frescos located on cylindrical surface was developed. The documentation is in the form of colour photomap representing developed surface. The photomap was made basing on non-metric colour photos. For image rectification the TIN method was used. Different methods were used to determine the vault shape and data for image resampling.

INTRODUCTION

The beauty and historical value of frescos call for their proper maintenance. Revitalisation and restoration of historical frescos usually begins with production of as found metric documentation. That documentation preserves the appearance of the art piece before conservation, can serve for further research and analysis, and often is used as a background for professional discussion about the way in which the artistic and iconographical value of fresco is to be preserved or changed during conservation.

A metric documentation of frescos can be produced with the use of direct measurement of the general outline of the painting, which is used as a base for hand drawing of the fresco contours or for the hand painting of fresco map. Another way of production of a metric documentation is a use of photogrammetric technique for collecting, transformation and presentation of the art piece copy.

All the frescos can be assigned, from the point of view of their shape and spatial location, to one of the following three classes:

- a fresco painted on a flat wall
- a fresco painted on a non flat, but developable surface (e.g. a cone or a cylinder)
- a fresco painted on a non-developable surface (e.g. a regular sphere, or other, not necessarily regular, spatial surface).

One can distinguish two types of particular features of metric documentation of a fresco. Depending on the shape of the surface, on which a fresco was painted, we can produce a map of fresco in homogenous or non-homogenous scale. The map in a homogenous scale can generally be called development of a fresco. The other types of maps, which can not be produced in homogenous scale, are generally called the maps in certain projection (which can be similar to the cartographic projections used to produce maps of Earth and other planets), and they need a separate discussion.

The frescos which lay on a flat wall can easily be presented as a map in a homogenous scale; such representation has all the attributes of development, but for the simplicity of terminology, we do not name it that way.

The frescos, which are located on developable surfaces, such as cylinder or cone, can be presented as a development on plain surface, and therefore can have geometrical documentation in a uniform scale.

In cases, when a fresco is located on other type of spatial surface, we can produce the fresco geometrical documentation only in special projection, which as a rule is not in a uniform scale.

In any case, documenting a fresco must consist of two stages. In the first stage the geometrical shape of the fresco surface must be measured and proper type of projection to a reference plane of a final record must be selected, to enable proper transfer of the painting iconographical content to the documentation sheet or to the computerised documentation digital map layer. This we can call geometrical rules of development of a wall painting. In the second stage that iconographical fresco content is to be copied from the wall to the documentation record.

REPRESENTATION OF THE VAULT SHAPE

A vault is generally constructed as a regular shape, but its current state due to many reasons (deformation of building) can differ from the designed shape.

To properly reconstruct the geometry of current state of a vault we should consider two approaches:

- to describe the shape by set of regularly or irregularly distributed points laying on the surface
- to approximate the shape by a mathematical function.

It is obvious, that to register the shape of a vault, one has to measure a representative group of points located on the vault surface. The density of such points depends on the regularity of the measured vault surface. This first stage of the development - determination of the fresco spatial surface - is decisive from the point of view of general accuracy of final development map.

Having a group of points which is representative for a vault surface, we can call them a digital model of our vault surface (DSM - Digital Surface Model). This group of points can be formed in a net of spatial triangles, and used directly for interpolation of required sections of the cylinder surface. But there is also possible to use those representative vault points to interpolate first a new set of points, which form a regular grid of 3D points; such grid has shape of squares in projection to the pre-selected plane. In both cases the DSM allows to calculate distances along any selected section of the vault surface. The distances calculated along the selected vault sections, which are perpendicular to the cylinder axis, allow producing certain type of co-ordinates on the vault surface. Such co-ordinates can be calculated for any point located on the vault surface, and can be used also as orthogonal co-ordinates on the vault development on a reference plane. This procedure treats each cross-section of our vault as a cross-section of a separate irregular cylinder, and allows producing sort of an irregular development of the vault surface. Such development irregularity depends on the irregularity of the vault itself, and all development errors are cumulative along the cross-sections used for calculation of distances on the fresco surface.

Another possibility of determination of the rules of development production is via the mathematical description of the spatial shape of fresco surface. To calculate mathematical parameters of such a surface, one has to use a representative group of points measured on the real fresco surface. Those points, not necessarily strictly regularly distributed on the surface, can be approximated by selected equation of mathematical surfaces. The surface fitting the group of points with the best accuracy can be used in the further processing. In case the selected mathematical representation of real surface is developable - we are able to produce real development of the painting. But when the painting is not placed on a cylindrical or conical surface of a vault, but on a spherical or other type of a dome - one has to construct the graphical documentation of the painting in a certain projection of the mathematical non-developable surface to a developable surface. Even the developable vaults do not have, though, to fit only one selected surface of approximation. In many cases we must consider two or more cylinders, crossing each other, to approximate the vault, portion by portion.

After a vault has been finally approximated, one should check the approximation accuracy. It is interesting to know not only how the mathematical surface fits the real one, but even more practical accuracy indicator would be to evaluate the influence of that approximation error on the relation between ceiling and the photogrammetric picture itself.

The strict relation between mathematical and real surfaces would be via projection of points of real surface perpendicularly to the mathematical surface of approximation. So it will be an error causing process to treat the photograph of painting as it would be image of mathematical surface, knowing, that certain points of mathematical surface are distant from the real surface point on the approximation error.

The influence of that approximation error (distance between the two surfaces) on the accuracy of development will depend on the difference between direction of the central perspective projection ray and the direction perpendicular to the mathematical surface. Those “perspective errors” can be quite great, when we use wide-angle cameras, and take pictures from the camera positions so located, that neither the camera axis is perpendicular to the photographed surface, nor the photographic distance is optimised from that point of view.

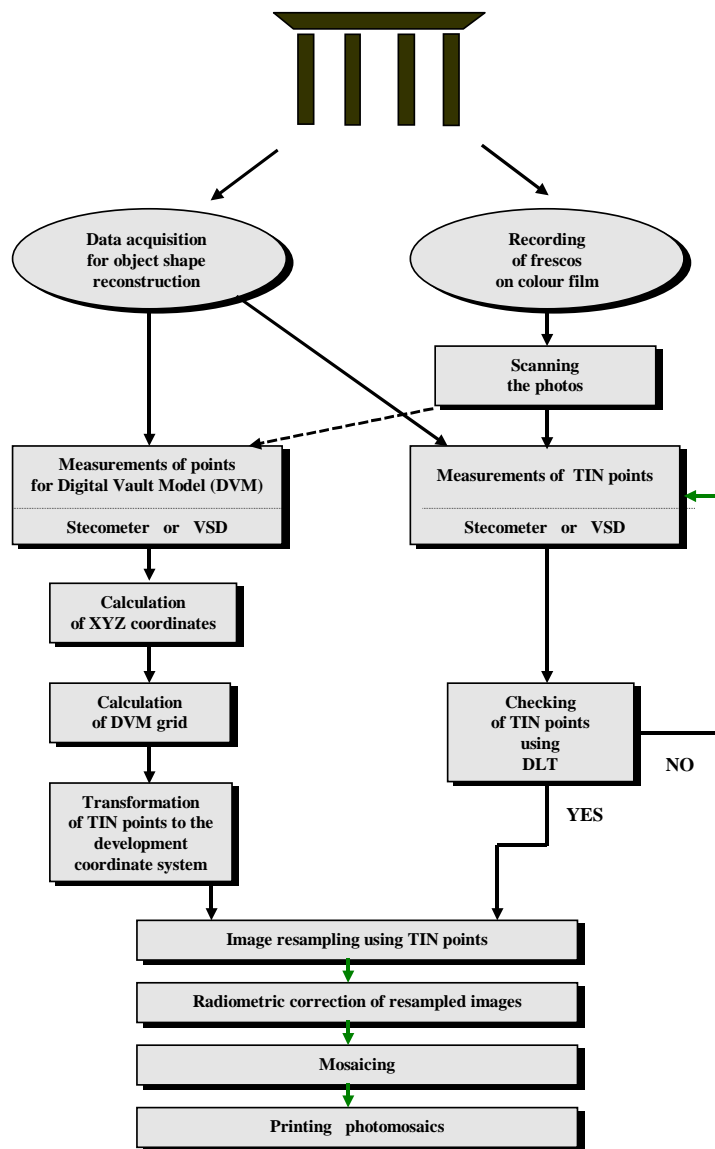


Fig.1. Scheme of creation of the digital representation of a non-flat frescos development

There are three ways to reduce the perspective errors. One is to use narrow camera angle, and optimise the camera position. Second is to reduce the distances between the real and mathematical surfaces (could be done by selection of additional approximation surfaces for smaller portions of ceiling, but edge adjustment problem arises in that case). The third way would mean the need for special type of mathematical projection in the used analytical-digital stereoplottor. The mathematical projection proper for such purpose should be designed so, that it would allow to measure the points in the co-ordinate system attached to the mathematical surface of approximation, and fitting the above mentioned relation between real and mathematical surfaces.

One must remember that the co-ordinate system of the development sheet comes directly from the mathematical surface, which is spread out on a plane. And all the perspective errors noticed on the

mathematical surface, will be exposed on the surface of development as well. The advantage of such algorithm of development is in local character of perspective errors (they do not cumulate).

TRANSFER OF THE FRESCO PRESENTATION

Having established a proper relation between the two surfaces, one is to transfer the representation of the painting from the image to the development plan. When the outline plane is to be produced - the vector polygons of representation are digitised, point by point.

When the photoplan of development is to be produced, one must consider the great number of pixels to be resampled in special projections. For that purpose the simplified methods can be considered. The most obvious method of simplification of resampling projection formulae would use the image portion as separate patches, which are individually rectified. The rectification formulae could be just a similarity transformation, or more advanced transformation functions, including those polynomials which compensate for the original surface curvature. Within resampling of one painting, we can consider several different rectification formulae, selected individually for separate patches. The more advanced degree of rectification function, the larger can be area covered by one patch, but the greater number of points would be needed to determine the rectification function coefficients. On the other hand - the greater is the patch area, the shorter are, per capita, the borders of joints of separate patches in one final photo-plan, what is very convenient to keep uniformed photomosaic colours and intensity.

There is variety of software, which offers automatic construction of triangles on the basis of a group of corresponding points measured on the ceiling, and on the rectified image. That automation requires, however very dense group of points, which generate small, regular triangles. In addition such automatic process creates some miss-interpretation errors close to the limits of the whole area to be rectified. Considering, that the points for rectification must be measured by a human operator, or semi-automatically under the human operator control, one can assume, that it could be better to create the triangles, or patches of other shape, also under the human operator control. That way the patches would be shaped according to the shape of ceiling, and in consequence the size of the area covered by each patch could be maximised. Also the direction of longer side of the patch could be optimised to fit the minimum ceiling curvature value and direction.

MEASUREMENT OF THE FIT POINTS FOR RECTIFICATION OF PATCHES

For the determination of the shape of a large surface it is often easier to use wide-angle terrestrial cameras, than to construct a photogrammetric block from a medium format nonmetric pictures, which are most suitable as a basis for resampling

In our experimental works we found out, that the most suitable would be to use 6*6cm nonmetric colour stereopairs for the detail iconographical recording and interpretation of the fresco. Also using those nonmetric stereopairs could be determined the group of points on the painting surface, measured to describe the surface mathematically, to create the digital surface model (DSM is the DTM equivalent), and to design transformation function between the object surface and its representation in development. The necessary control points for those nonmetric pictures of limited field of view can be determined on the metric 13*18 stereopairs taken with UMK. Relation between nonmetric stereopair and object space could be executed with the use of DLT function.

For some object portions, which were not recorded with the nonmetric stereopairs, but only with single nonmetric 6*6cm pictures, the DSM could be created on the basis of metric 13*18cm stereopairs. But the corresponding points on the object surface (given by 13*18cm photographs), and on the 6*6cm photographs, which determine the patches image transformation, must be very carefully selected among characteristic points of the images. That forces often the shape of the patch, which is far from optimal. And, what is the worst, that work is very tough, time consuming and unpleasant for the operator.

As in general, the photogrammetric technology of production of developments must be based on digital photogrammetric methods, it would be very practical to use digital analytical stereoplotter for the most measurements on the metric pictures, and for all the measurements on the non metric stereo pairs, and single nonmetric pictures. For that purpose very practical should be the VSD (Video Stereo Digitiser) constructed at our University. That stereoplotter allows performing classical 3-step orientation of metric stereopairs, or one step DTL orientation for nonmetric stereopairs or single pictures. The measured

points and vectors can be displayed on the computer screen, what is very convenient for the measurement of correspondent points, which determine the patches. The VSD it is a modern low cost professional instrument, and therefore its price for the final transfer of elementary portions of photographs of painting details to the development does not influence the scope of applications of that instrument for the cultural heritage documentation.



Fig.2. Development of XVIII century frescos from cross-vault ceiling of Cyster's Abbey in Lubiaz (Poland).
Reproduction of fragment of the colour photomosaic (original scale 1:20)



Fig.3. Development of XVIII century frescos from cross-vault ceiling of Cyster's Abbey in Lubiaz (Poland).
Reproduction of the colour photomosaic (original scale 1:20)



Fig.4. Development of XVIII century frescos from cylindrical vault of Pijar's church in Cracow (Poland)
Reproduction of the colour photomosaic (original scale 1:20)

EXPERIMENTS

In the last year we completed, for conservation purposes, the documentation of the valuable paintings located on ceiling in churches and abbey. We assume that the final output in the form of colour photomosaic should fulfil the graphical accuracy $<0,5\text{mm}$. Photos of frescos were taken with amateur, non-metric cameras (6x6 cm and 24x36mm) on diapositive or negative colour film. For one object we use the archive colour photos. The all available photos were converted into digital form by scanning with resolution 2000dpi.

We used three technological lines for determining the vault shape and TIN points.

1. Control points (identified on amateur colour photos for DLT transformation) and points defining the object shape were surveyed by direct field measurement. Points necessary for image resampling were measured on non-metric photos (VSD-AGH). Spatial coordinates were calculated basing on image coordinates and DLT (Church of Pijars in Kraków)

2. The object shape was determined with the use of black-white metric stereomodel composed of photos taken with UMK 10/1318. TIN points were identified and measured on those models (Stecometer) and on colour non-metric photos (x,y) used for image resampling (VSD-AGH). The procedure of point identification was very laborious (Cysters Abbey Lubiąż).

3. The points defining the object shape and TIN points were measured on stereomodels composed of colour non-metric photos (VSD-AGH), but control points necessary for DLT orientation were determined with the use of metric black-and-white stereomodels (Stecometer).

The flow chart of used technology is shown on Fig.1. Basing on all available data (freely) distributed points, points along profiles, control points etc.) the Digital Surface Model (DSM) was created in the form of regular grid. Polynomial regression and other suitable interpolation method was used to create the grid. For TIN points the coordinates in development were then calculated. In case of cylindrical object one coordinate is equal to the length of arc. For image resampling the Triangulated Irregular Network (TIN) method was used. Then resampled images were corrected radiometrically (using Level, Color Balance, Brightness & Contrast, Filters and others correction) basing on colour photos and field inspection and pasted by mosaicing. Last step was printing the hard copies of documentation (see Fig.2,3,4).

ACKNOWLEDGEMENT

The described technology was developed and examined during execution of projects concerning historical monuments in Krakow and Lubiaz, with participation of the following team of The Department of Photogrammetry and Remote Sensing Informatics of AGH in Kraków: Prof.Dr J.Jachimski, Dr W.Mierzwa, Dr A.Boroń, Dr A.Wróbel, Dr R.Tokarczyk, Mgr M.Borowiec, Mgr J.Zieliński and students of diploma semester of our Faculty of Mining Geodesy and Environmental Engineering. The colours of final plots of photomaps were corrected with conceptual help of conservationists from Kraków Academy of Fine Arts: Prof. Dr W.Zalewski, Mgr M.Kalicińska, Mgr G.Schulze-Głazik, Mgr A.Mamoń, Mgr P.Białko.

Address of the Authors:

Department of Photogrammetry and Remote Sensing Informatics
University of Mining and Metallurgy
Kraków, al.Mickiewicza 30, paw.C-4
Poland
tel.(++4812) 6173826
E-mail: jjachim@uci.agh.edu.pl
