

Załącznik nr 2
(PL)

AUTOREFERAT
przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

Dr inż. Robert Krzyżek

Katedra Geomatyki
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Kraków 2016

Spis treści

1. Imię i nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.).....	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe	4
4.3. Omówienie celu naukowego wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.....	6
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo badawczych	31
5.1. Działalność prowadzona przed doktoratem	31
5.2. Działalność prowadzona po doktoracie	33

1. Imię i nazwisko

Robert Krzyżek

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- ✓ 1996: tytuł zawodowy magistra inżyniera w dyscyplinie Geodezja i Kartografia w zakresie geodezja w gospodarce nieruchomościami, uzyskany na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.
Praca magisterska pod tytułem „*Zniesienie współwłasności nieruchomości i dział spadku*” została obroniona 21 czerwca 1996 roku. Opiekunem pracy była dr hab. inż. Zofia Śmiałowska-Uberman (Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków).
- ✓ 2004: stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Geodezja i Kartografia uzyskany na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.
Praca doktorska pod tytułem „*Zastosowanie RTK GPS do pomiarów wykonywanych w celu opracowania map wielkoskalowych*” została obroniona 29 czerwca 2004 roku.
Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Beluch (Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków)
Recenzenci: prof. dr hab. inż. Stefan Cacoń (Politechnika Wrocławska, Wrocław),
dr hab. inż. Jacek Szewczyk, prof. nadzw. AGH (Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków).

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- ✓ 1996–2004: Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska na stanowisku asystenta,
- ✓ 2004– obecnie: Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska na stanowisku adiunkta,

- ✓ 2004–2009: Wyższa Szkoła Biznesu i Przedsiębiorczości w Ostrowcu Świętokrzyskim, Wydział Nauk Społecznych i Technicznych, Katedra Geodezji i Kartografii na stanowisku adiunkta,
- ✓ 2009-2012: Wyższa Szkoła Biznesu i Przedsiębiorczości w Ostrowcu Świętokrzyskim, Wydział Nauk Społecznych i Technicznych, Katedra Geodezji i Kartografii na stanowisku docenta,
- ✓ 2012–obecnie: Wyższa Szkoła Biznesu i Przedsiębiorczości w Ostrowcu Świętokrzyskim, Wydział Nauk Społecznych i Technicznych, Katedra Geodezji i Kartografii na stanowisku adiunkta,

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.), przedstawiam cykl siedmiu publikacji powiązanych tematycznie, zatytułowany:

Optymalizacja dokładnościowa pośredniego wyznaczenia położenia narożników budynków na podstawie zmodyfikowanych procedur obliczeniowych wyników pomiarów RTN GNSS

4.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Poniżej prezentuję wykaz siedmiu publikacji stanowiących moje oryginalne osiągnięcie naukowe. Publikacje te zostały przedstawione w porządku chronologicznym.

W każdej z wymienionych poniżej publikacji powiązanych tematycznie, stanowiących oryginalne osiągnięcie naukowe, mój udział wyniósł 100%. Polegał on na opracowaniu koncepcji badań, przeprowadzeniu pomiarów terenowych, opracowaniu uzyskanych wyników, dokonaniu szeregu analiz, stworzeniu autorskich algorytmów oraz opracowań graficznych i bibliograficznych.

- [1] Krzyżek R. 2014. *Reliability analysis of the results of RTN GNSS surveys of building structures using indirect methods of measurement*, Geodesy and Cartography, vol. 63 no. 2, s. 161-181, (udział 100%).
- [2] Krzyżek R. 2015. *Routing corners of building structures – by the method of vector addition – surveyed with RTN GNSS technology using indirect methods of measurement*, Artificial Satellites Journal of Planetary Geodesy, vol. 50 no. 4, s. 181-200, (udział 100%).
- [3] Krzyżek R. 2015. *Modernization of the method of line-line intersection using RTN GNSS technology for determining the position of corners of buildings*, Artificial Satellites Journal of Planetary Geodesy, vol. 50 no. 1, s. 41-57, (udział 100%).
- [4] Krzyżek R. 2015. *Algorithm for modelling coordinates of corners of buildings determined with RTN GNSS technology using vectors translation method*, Artificial Satellites Journal of Planetary Geodesy, vol. 50 no. 3, s. 115–125, (udział 100%).
- [5] Krzyżek R. 2015. *Innovative algorithm of vector translation method for the measurements of corners of building structures using RTN GNSS technology*, Geomatics and Environmental Engineering, vol. 9 no. 4, s. 73-84, (udział 100%).
- [6] Krzyżek R. 2015. *Mathematical analysis of the algorithms used in modernized methods of building measurements with RTN GNSS technology*, Boletim de Ciências Geodésicas, vol. 21 no. 4, s. 848-866, (udział 100%).
- [7] Krzyżek R. 2015. *Modyfikacja współrzędnych naroży budynku wyznaczonego w trybie RTN GNSS z zastosowaniem autorskiego algorytmu środka ciężkości NPsc*, Przegląd Geodezyjny, 12/2015 s. 13-17, (udział 100%).

4.3. Omówienie celu naukowego wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Budynki są jednymi z najważniejszych szczegółów terenowych, podlegających typowym pomiarom sytuacyjno-wysokościowym. Równoległe obok granic nieruchomości, stanowią niezwykle newralgiczny element w dyskusjach na temat wiarygodności i dokładności ich wyznaczania w pomiarach geodezyjnych. Od momentu, gdy w pracach geodezyjnych zaczęto wykorzystywać tachimetry elektroniczne, tachimetria stała się najczęściej stosowaną metodą do wyznaczania położenia budynków, co było uzasadnione zarówno pod względem merytorycznym jak i dokładnościowym uzyskiwanych rezultatów. Na przełomie XX i XXI wieku nastąpił bardzo intensywny rozwój nowoczesnych technologii pomiarowych opartych na pomiarach satelitarnych, wykonywanych w różnych trybach, wykorzystywanych w geodezji. Ciągłe poszukiwanie coraz to doskonalszych rozwiązań technologicznych podnoszących wiarygodność wyników pomiaru szczegółów terenowych z wykorzystaniem technologii działających w czasie rzeczywistym, skutkowało tym, że wielu geodetów wykorzystywało i wciąż stosuje do wyznaczania budynków pomiary w trybie RTK/RTN GNSS. Wywołało to dyskusje i dylematy dotyczące wiarygodności i dokładności wyznaczania narożników budynku w czasie rzeczywistym. Pomiary w trybie RTK/RTN GNSS mają jedną bardzo istotną wadę – wymagają odkrytego horyzontu. W przypadku pomiaru obiektów trudnodostępnych dla technologii RTK/RTN GNSS, w tym budynków, często dochodzi do wielu nieprawidłowości (pomiar przy małej liczbie satelitów, znacznym wzroście wartości *PDOP* itp.), które podważają wiarygodność uzyskanych wyników pomiaru. Z tego powodu wyznaczone współrzędne narożników budynku są obarczone często dużymi błędami, a forma geometryczna całego obiektu w stosunku do wymiarów rzeczywistych jest zniekształcona.

W związku z powyższym, głównym celem moich badań naukowych było opracowanie korekt obliczeniowych do technologii RTK/RTN GNSS pomiaru budynków, zapewniających większą wiarygodność i wyższą dokładność od dotychczasowej. Pozwoliłoby to na jej stosowanie jako alternatywnej technologii w stosunku do klasycznej tachimetrycznej metody pomiarowej. Do chwili obecnej, nikt jednak nie podjął próby doprowadzenia do uzyskiwania porównywalnych wyników wyznaczenia naroży budynku na podstawie pomiarów w trybie RTK/RTN GNSS z metodą klasyczną, z uwzględnieniem wymogów dokładnościowych regulowanych przez obowiązujące standardy w geodezji.

W pierwszej kolejności dokonałem ogólnej oceny możliwości wykorzystania różnych pośrednich metod pomiarowych w technologii RTK/RTN GNSS do wyznaczania położenia

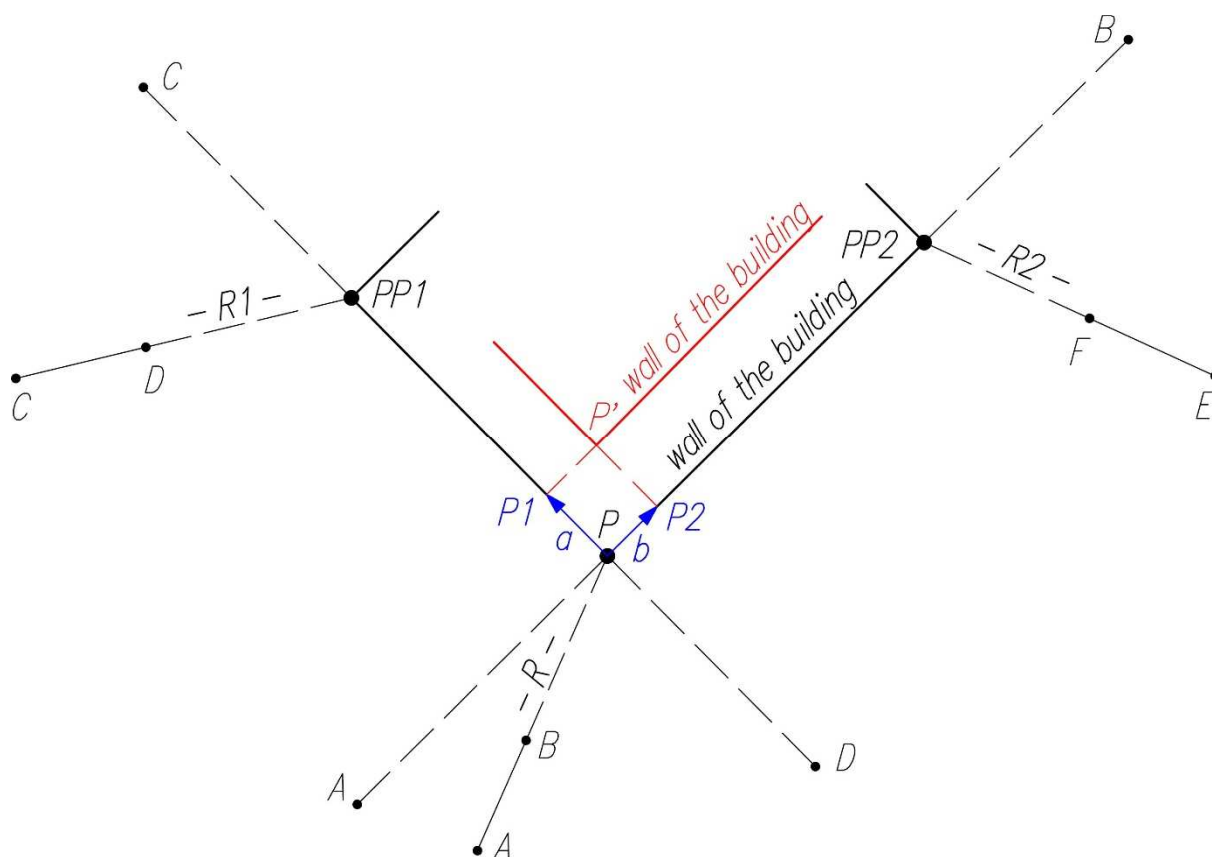
naroży budynków. Wyniki tych badań zaprezentowałem w artykule [1] *Reliability analysis of the results of RTN GNSS surveys of building structures using indirect methods of measurement*. Artykuł ten jest niejako wprowadzeniem do rozważań prowadzonych w cyklu publikacji powiązanych tematycznie. W badaniach wykonanych na obiekcie testowym uwzględniłem metody pośrednich pomiarów satelitarnych z wykorzystaniem konstrukcji geometrycznych, takich jak: *punkt na prostej*, *przecięcia prostych* oraz *wcięcia liniowe*. W przeprowadzonym eksperymencie badawczym analizowałem uzyskane z pomiarów współrzędne naroży budynków i ich średnie błędy oraz relacje długości odcinków obliczanych ze współrzędnych w stosunku do czołówek z pomiarów kontrolnych. Przeprowadziłem analizę statystyczną wspomnianych parametrów, w wyniku której można stwierdzić, że metoda *wcięcia liniowego* wykorzystywana w pomiarach RTK/RTN GNSS do wyznaczenia położenia naroży budynku, daje najlepsze rezultaty pod każdym względem, to znaczy najbardziej prawdopodobne współrzędne, najmniejsze ich średnie błędy oraz najlepszą zgodność czołówek wyliczonych ze współrzędnych i bezpośrednio pomierzonych. Pozostałe metody, *punktu na prostej* oraz *przecięcia prostych*, wymagają pewnych modyfikacji obliczeniowych w celu zwiększenia ich wiarygodności pod kątem wyznaczania położenia budynków na podstawie pomiarów satelitarnych w czasie rzeczywistym. W kontekście otrzymanych wyników badań, nakreśliłem szkic kolejnych eksperymentów badawczych koniecznych do zrealizowania postawionego celu naukowego. Zaproponowałem rozwiązania prowadzące do uzyskania możliwie najlepszej zgodności czołówek budynku pomierzonego technologią RTK/RTN GNSS, z wykorzystaniem metody pośredniej, w stosunku do pomiaru bezpośrednio wykonanego przyziarem liniowym – ruletką. Kolejną modyfikacją metod pośrednich, a szczególnie metody *przecięcia prostych*, była korekta ich wyników (współrzędnych X i Y) w stosunku do najbardziej prawdopodobnego położenia naroży budynku. Za najbardziej prawdopodobne położenie naroży budynku (również w metodach opisywanych w dalszej części autoreferatu) należałoby przyjąć ich współrzędne X, Y, uzyskane w wyniku pomiaru testowego metodą tachimetryczną, nawiązaną do osnowy pomiarowej specjalnie założonej dla obiektu testowego. Wysoka dokładność wyznaczenia położenia punktów osnowy pomiarowej pozwoliła na przyjęcie wyników pomiaru tachimetrycznego jako danych referencyjnych dla współrzędnych X i Y, otrzymanych z pomiaru technologią RTK/RTN GNSS. Szczegółowe uzasadnienie takiego założenia, z uwzględnieniem równocześnie jednorodności wyników pomiaru, zostało przedstawione bezpośrednio w artykule [1]. W efekcie finalnym otrzymujemy kontur budynku wyznaczony w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem pośrednich metod pomiaru o najbardziej prawdopodobnym położeniu (współrzędne X, Y), w stosunku do wyników pomiarów

tachimetrycznych oraz formie geometrycznej (zgodność czołówek) w granicach tolerancji błędów pomiarowych przy miarę liniowego (ruletki).

Po wyznaczeniu kolejnych celów badawczych wynikających z pierwszej publikacji, przystąpiłem do tworzenia autorskich algorytmów, zdecydowanie zwiększających wiarygodność uzyskiwanych wyników pomiaru budynków w czasie rzeczywistym. Pierwszy algorytm zwany **metodą sumy wektorów** przedstawiłem w artykule [2] *Routing corners of building structures – by the method of vector addition – surveyed with RTN GNSS technology using indirect methods of measurement*. W pracy rozpatrzony został problem wykonywania pomiarów budynków w trybie RTK/RTN GNSS z zastosowaniem zmodernizowanych procedur obliczeniowych dla dwóch pośrednich metod pomiarowych: *metody przecięcia prostych oraz punktu na prostej*. Jak już wcześniej wspominałem, w wyniku pomiarów w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem klasycznych pośrednich metod pomiaru (*metody przecięcia prostych czy punktu na prostej*) otrzymujemy obiekt budowlany (budynek) w pewnym stopniu zdeformowany. Zniekształcenie to polega na niezgodności wymiarów rzeczywistych budynku (czołówek) w stosunku do wyliczonych z pomiarów satelitarnych. W celu eliminacji tych rozbieżności, a więc zapewnienia możliwie największej zgodności formy geometrycznej budynku uzyskanej z obu pomiarów, zastosowałem koncepcję korekt – wynikających z **metody sumy wektorów** – do wyznaczenia poprawek wartości liniowych (czołówek) lica ścian budynku. Ogólną zasadę jej realizacji zilustrowałem na rysunku 1. Rysunek ten przedstawia dwie niezależnie stosowane pośrednie metody pomiaru: *punktu na prostej i przecięcia prostych*.

Praktyczna realizacja autorskiego algorytmu **sumy wektorów** do określenia położenia narożnika budynku wyznaczonego w trybie RTN GNSS, z wykorzystaniem pośrednich metod pomiaru: *punktu na prostej i przecięcia prostych*, przedstawia się następująco:

1. Wyznaczenie położenia punktów P (na rysunku 1: P , $PP1$, $PP2$) wszystkich naroży budynku w trybie RTN GNSS, z wykorzystaniem wymienionych pośrednich metod pomiaru oraz obliczenie czołówek ze współrzędnych. Na rysunku 1 (w celu różnicowania i ułatwienia oznaczeń we wzorach dla metody *punktu na prostej*) sąsiednie punkty względem wybranego punktu P zostały oznaczone przez $PP1$ i $PP2$.
2. Pomiar kontrolny lica ścian budynku (czołówek) ruletką.
3. Obliczenie różnic czołówek zestawionych dla poszczególnych ścian budynku. Na tym etapie należy zwrócić szczególną uwagę na ustalenie właściwego znaku (+ lub -) uzyskanych różnic czołówek, wynikającego z ustalonej reguły odejmowania wyników.



Legenda:

- A, B, C, D, E, F, \dots - punkty bazowe pomierzone technologią RTN GNSS
- $R, R1, R2$ - pomiar liniowy ruletką odcinków odpowiednio: $B-P, D-PP1, F-PP2$
- $P, PP1, PP2$ - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni
- a, b - wektory wyznaczone w oparciu o różnice czołówek
- $P1, P2$ - punkty pomocnicze wyznaczone na podstawie wektorów a i b
- P' - punkt narożnika budynku wyznaczony po zastosowaniu metody sumy wektorów

Rys. 1. Ilustracja metody sumy wektorów do trasowania punktu wyznaczonego w trybie RTN GNSS z wykorzystaniem pośrednich sposobów pomiaru – punktu na prostej i przecięcia prostych

4. Obliczenie długości wektorów a i b (Rys. 1), stanowiących połowę wartości uzyskanych różnic czołówek dla poszczególnych ścian budynku.
5. Obliczenie przyrostów współrzędnych odcinków $PP1$ i $PP2$ dla sąsiednich ścian budynku z wykorzystaniem:
 - dla metody *punktu na prostej*:
 - współrzędnych biegunowych, czyli długości wektorów a i b oraz azymutów odpowiednio $AP-PP1$ i $AP-PP2$.
 - dla metody *przecięcia prostych*
 - współrzędnych biegunowych, czyli długości wektorów a i b oraz azymutów odpowiednio $AP-C$ i $AP-B$.

Azymut boków P-C lub P-B może być zastąpiony odpowiednio azymutem boków P-D lub P-A w zależności od znaku (+ lub -) wektorów a i b .

6. Obliczenie położenia punktu P' przez zastosowanie **metody sumy wektorów** a i b , w stosunku do punktu P , za pomocą wzoru (poniżej przedstawiono wzór tylko dla jednej z pośrednich metod, to jest przecięcia prostych):

$$X_{P'} = \frac{Y_C - Y_A + tgA_{(AB)} \cdot X_A - tgA_{(CD)} \cdot X_C}{tgA_{(AB)} - tgA_{(CD)}} + a \cdot \cos A_{(P-C)} + b \cdot \cos A_{(P-B)} \quad (1)$$

$$Y_{P'} = Y_A + tgA_{(AB)} \cdot \left(\frac{Y_C - Y_A + tgA_{(AB)} \cdot X_A - tgA_{(CD)} \cdot X_C}{tgA_{(AB)} - tgA_{(CD)}} - X_A \right) + a \cdot \sin A_{(P-C)} + b \cdot \sin A_{(P-B)}$$

7. Ponowne zestawienie czołówek uzyskanych z pomiaru kontrolnego i wyliczonych w oparciu o współrzędne punktów (narożników budynku) P' po zastosowaniu **metody sumy wektorów**.

W wyniku powtórzonej kontroli czołówek zgodność miar kontrolnych nie przekroczyła błędu obliczeń na poziomie od $\pm 0.01m$ do $\pm 0.02m$.

Metoda sumy wektorów zapewnia pełną zgodność czołówek obliczonych ze współrzędnych z rzeczywistymi pomiarami terenowymi. Jednak ta zgodność wymiarów budynku jest tylko połowicznym sukcesem w doprowadzeniu pośrednich metod pomiaru do wyników odzwierciedlających rzeczywiste położenie obiektu w terenie i na mapie. Drugim problemem, który wciąż pozostaje do rozwiązania jest ocena wiarygodności współrzędnych naroży budynku po zastosowaniu **metody sumy wektorów**, zwłaszcza w odniesieniu do metody *przecięcia prostych*. W metodzie tej, po zastosowaniu **algorytmu sumy wektorów**, współrzędne naroży budynku wciąż znacznie różnią się od wartości uznanych za najbardziej prawdopodobne. W celu wyjaśnienia zaistniałej sytuacji należy zwrócić uwagę na dwie kwestie. Po pierwsze, w metodzie *przecięcia prostych* występują błędy wtyczania punktów bazowych na przedłużenia lica ścian budynku. To z kolei generuje znaczne różnice współrzędnych między wyznaczanym narożnikiem budynku, a wartościami przyjętymi za najbardziej prawdopodobne. Po drugie, skutkiem tych błędów są także różnice w kątach wierzchołkowych narożników budynku, pomiędzy stanem rzeczywistym w terenie (określonym na podstawie współrzędnych przyjętych za najbardziej prawdopodobne), a tym, który otrzymujemy po zastosowaniu metody *przecięcia prostych*. Choć obie wartości katowe przyjmują różne wielkości, to należy podkreślić ich konwergencję w stosunku do kąta prostego. Wynika to z faktu, że najczęściej spotykaną sytuacją (widoczną już na etapie projektów budowlanych) są kąty równe 90^0 między sąsiednimi ścianami budynku. Niestety w wyniku

różnych czynników mających bezpośredni lub pośredni wpływ na kształtowanie się tego kąta w terenie, jego wartość często odbiega od nominalnej. Ten aspekt może i powinien stanowić jeden z atrybutów podlegających weryfikacji w procesie kompleksowej modernizacji obliczeń w metodzie *przecięcia prostych*.

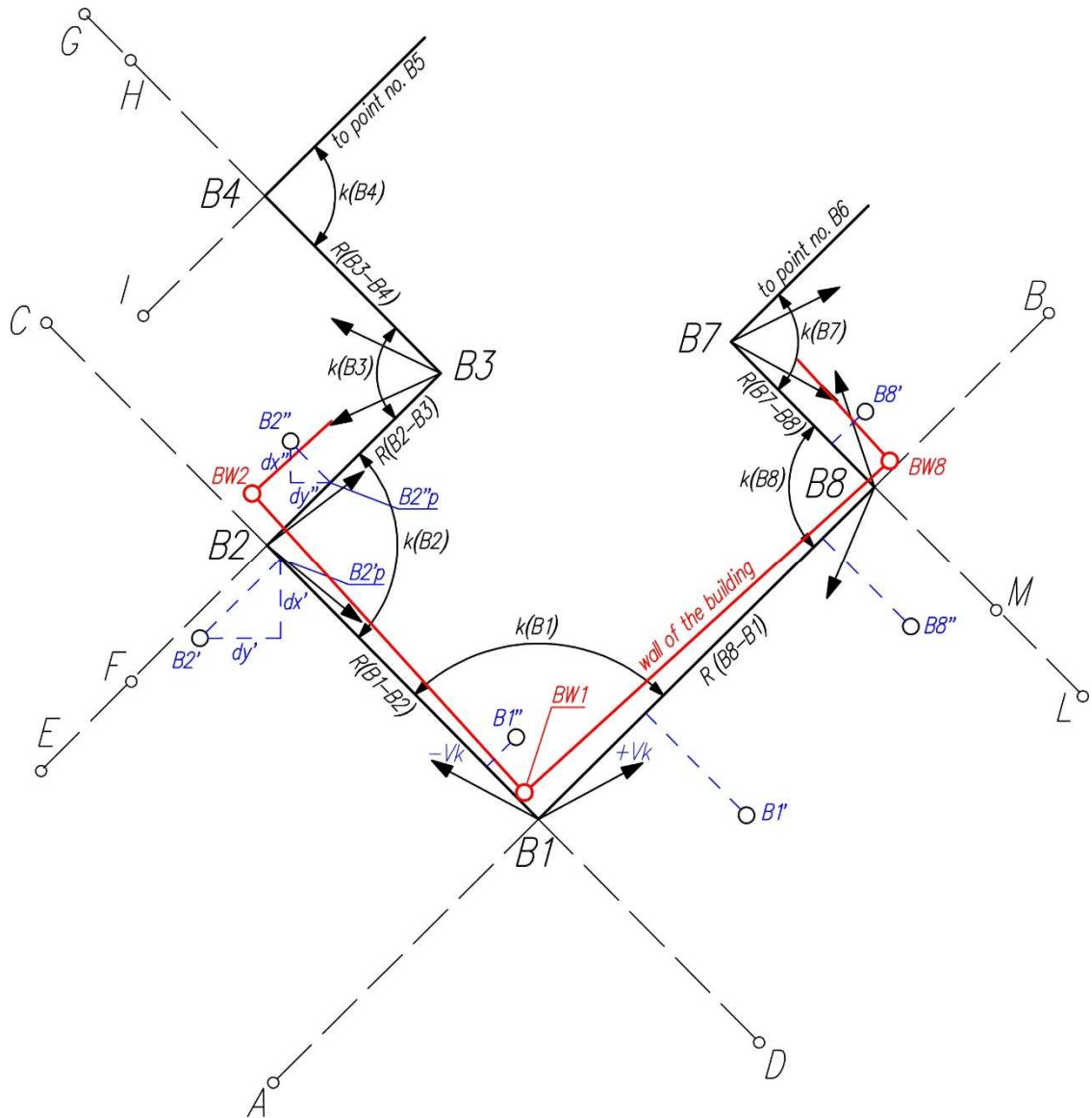
Z kolei metoda *punktu na prostej*, po uwzględnieniu **metody sumy wektorów**, pozostaje trudnym problemem w jednoznacznej interpretacji ostatecznych wartości współrzędnych. Z jednej strony, przeciętne wartości obliczanych różnic współrzędnych (niewielkie różnice) w analizowanej metodzie (metoda *punktu na prostej* przed i po zastosowaniu **algorytmu sumy wektorów**) oraz weryfikacja postawionych hipotez w analizie statystycznej, sugerowałyby na zakwalifikowanie otrzymanych współrzędnych (po zastosowaniu **metody sumy wektorów**) jako ostateczne, czyli najbardziej prawdopodobne. Z drugiej zaś strony, przedziały w jakich kształtują się te różnice są na poziomie $\pm 0.05\text{m}$, a więc mogą dawać podstawę do ograniczonego zaufania do uzyskanych wartości, uznanych za ostateczne. W związku z tym, w celu zwiększenia wiarygodności wyznaczenia najbardziej prawdopodobnych współrzędnych naroży budynku, można poddać metodę *punktu na prostej* kolejnym modyfikacjom obliczeniowym prowadzącym do jeszcze większej wiarygodności uzyskanych rezultatów. Reasumując należy stwierdzić, że choć zmodyfikowana metoda *punktu na prostej* pozytywnie koryguje uzyskiwane surowe wyniki pomiaru, to pozostawia jednak pewien wachlarz wątpliwości co do całkowitej wiarygodności uzyskiwanych rezultatów. Postępowanie zmierzające do modyfikacji metod *przecięcia prostych* i *punktu na prostej*, w celu osiągnięcia jeszcze bardziej wiarygodnych współrzędnych naroży budynku, uznanych za najbardziej prawdopodobne, stanowiły kierunek kolejnych moich badań.

W pierwszej kolejności skupiłem się na doskonaleniu metody *przecięcia prostych*. W tym celu przeprowadziłem badania zmierzające do zwiększenia wiarygodności uzyskiwanych współrzędnych naroży budynków z pomiarów RTN GNSS, poprzez zastosowanie rozwiązania, korygującego uzyskane wyniki z wykorzystania pośredniej metody *przecięcia prostych* - tak zwanym autorskim **algorytmem połowy kąta**. Jest to nowy, niezależny względem metody *sumy wektorów*, algorytm wprowadzający korekty do procedury obliczeniowej współrzędnych narożników budynku. Wyniki szczegółowych badań przedstawiłem w artykule [3] *Modernization of the method of line-line intersection using RTN GNSS technology for determining the position of corners of buildings*. Zasada funkcjonowania **metody połowy kąta** opiera się na teoretycznym założeniu wzajemnego usytuowania ścian budynku, a więc kąta prostego w każdym narożniku budynku. W procedurze obliczeniowej przyjąłem założenie przecięcia konturów sąsiednich ścian budynku pod kątem 90° , uważając, że błąd takiego

założenia jest znacznie mniejszy od błędu kąta wyznaczonego na podstawie współrzędnych określonych w oparciu o wyniki pomiarów GNSS. Wyniki obliczeń uzyskane na tym etapie stanowiły jeden z elementów składowych w dalszym postępowaniu wyznaczania korekt w procedurze obliczeniowej. Weryfikacja tego założenia została dokonana podczas badań empirycznych szczegółowo opisanych w artykule [2]. Oczywiście na wstępie należy zaznaczyć, że rozwiązanie takie może być stosowane tylko do budynków, w których już na etapie projektu technicznego budynku występowało założenie prostopadłości ścian. **Metoda połowy kąta** nie może więc być stosowana do budynków lub ich fragmentów, w których występują ściany zaokrąglone lub tzw. wykusze. W celu uzyskania zoptymalizowanych rezultatów obliczeń, następuje konwersja otrzymanych wyników do wartości zbieżnych w stosunku do najbardziej prawdopodobnych współrzędnych.

Podstawowe założenia zaproponowanej metody przedstawiłem na rysunku 2. Poniżej wyszczególniłem najważniejsze czynności techniczno-rachunkowe, generujące algorytm modyfikacji metody przecięcia prostych metodą **połowy kąta**.

1. Po wykonaniu pomiaru punktów bazowych A, B, C, D, E, F, ... L, M technologią RTN GNSS i obliczeń z przecięcia prostych, otrzymujemy współrzędne X, Y naroży budynków *B1-B8*.
2. Z uzyskanych współrzędnych obliczamy kąty wierzchołkowe narożników budynku *k(B1)-k(B8)*.
3. Obliczamy odchyłkę kątową w każdym narożniku budynku, np. $f_k = k_{Bi} - 100^g$
4. Obliczamy poprawkę kątową dla kierunku sąsiednich ścian każdego narożnika budynku
$$v_k = \frac{-f_k}{2}$$
5. Z każdego narożnika budynku, przykładowo dla narożnika *B1*, wykonujemy po raz drugi obliczenia współrzędnych X i Y punktów (narożników) sąsiednich *B2, B8*, wykorzystując współrzędne punktu biegunowego - narożnika *B1* - i nawiązanie na sąsiedni narożnik - odpowiednio *B2 i B8* - oraz współrzędne biegunowe, czyli kąt równy $v_k = \frac{-f_k}{2}$ wraz z długością równą czołowce do sąsiedniego punktu, czyli odpowiednio *R(B1-B2)* i *R(B8-B1)*. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na znak poprawki kątowej v_{ki} – odkładając kąt od prostej nawiązania na sąsiedni punkt (narożnik), zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara przyjmujemy znak „+” a w przeciwnym kierunku znak „-”. W ten sposób otrzymujemy nowe współrzędne punktów sąsiednich (narożników) budynku, np. *B2', B8''*.



Legenda:

$B1 - B8$

- naroża budynku powstałe z metody przecięcia prostych punktów bazowych A, B, C, D, E, F, itd.

$BW1 - BW8$

- naroża budynku powstałe ze zmodernizowanej metody przecięcia prostych metodą *połowy kąta*,

$k(B1) - k(B8)$

- kąty wierzchołkowe narożników budynku obliczone ze współrzędnych punktów $B1-B8$,

V_k

- poprawka kątowa wyznaczona dla każdego narożnika budynku

$R(B1-B2) - R(B8-B1)$

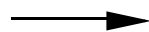
- długość równa czołówce dla każdego lica ściany budynku,

$B1'-B8', B8''-B1''$

- naroża budynku wyznaczone metodą biegunową w kierunku głównym $B1' - B8'$ i powrotnym $B8'' - B1''$,

$B1'p-B8'p, B8''p-B1''p$

- punkty pomocnicze (do określenia wag) wyznaczone w kierunku głównym $B1'p-B8'p$ i powrotnym $B8''p-B1''p$,



- kierunek realizacji poprawki kątowej („połowy kąta”).

Rys. 2. Zmodyfikowana metoda przecięcia prostych – metoda *połowy kąta*.

6. Dla każdego narożnika budynku wykonujemy czynności obliczeniowe opisane w punkcie 5. W ten sposób uzyskujemy dla każdego kolejnego punktu (narożnika budynku) dwa położenia:

- z głównego kierunku obliczeń współrzędne X, Y punktów $B1'-B8'$,
- z powrotnego kierunku obliczeń współrzędne X, Y punktów $B8''-B1''$.

7. W celu uzyskania jednoznacznego położenia punktu (najbardziej prawdopodobnych współrzędnych X i Y) wykonujemy obliczenia prowadzące do określenia średniej ważonej położenia narożnika budynku.
8. Dokonujemy obliczenia wag dla każdego z punktów $B1'-B8'$ i $B8''-B1''$, np. dla punktów $B2'$ i $B2''$:

$$p_{x_{B2'}} = \frac{1}{dx'^2} \quad p_{y_{B2'}} = \frac{1}{dy'^2} \quad p_{x_{B2''}} = \frac{1}{dx''^2} \quad p_{y_{B2''}} = \frac{1}{dy''^2} \quad (2)$$

9. Elementy dx' , dy' oraz dx'' , dy'' obliczamy rzutując ortogonalnie każdy z punktów $B2'$, $B2''$ na prostą nawiazania, względem której był wyznaczany, uzyskując punkty pomocnicze $B2'p$, $B2''p$, przy czym dx' , dy' oraz dx'' , dy'' są przyrostami współrzędnych tych odcinków, np. od $B2'$ do $B2'p$ oraz od $B2''$ do $B2''p$.
10. Obliczamy współrzędne X i Y narożników budynku $BW1 - BW8$ jako średnie ważone, np. dla punktu $BW2$:

$$X_{BW2} = \frac{X_{B2'} \cdot p_{x_{2'}} + X_{B2''} \cdot p_{x_{2''}}}{p_{x_{2'}} + p_{x_{2''}}} \quad (3)$$

$$Y_{BW2} = \frac{Y_{B2'} \cdot p_{y_{2'}} + Y_{B2''} \cdot p_{y_{2''}}}{p_{y_{2'}} + p_{y_{2''}}}$$

11. Obliczamy czołówki z nowo wyznaczonych współrzędnych narożników budynku i porównujemy je z danymi pomiarowymi (czołówki z pomiaru), które spełniają kontrolną rolę wyników całej procedury obliczeniowej.

Po wyznaczeniu nowych współrzędnych wszystkich naroży budynku, jak wynika z przeprowadzonych i opisanych powyżej badań, otrzymane wartości są zbliżone do najbardziej prawdopodobnych. Również różnice między miarami kontrolnymi (czołówkami) a otrzymanymi z obliczeń – *punkt 11 algorytmu* - zasadniczo nie przekraczają wartości ok. 5-6 cm. Na podstawie wyników badań przedstawionych w artykule [3] można stwierdzić, że zmodyfikowana metoda *przecięcia prostych*, wykorzystywana w trybie RTN GNSS z zastosowaniem **metody połowy kąta**, znacznie poprawia wiarygodność wyznaczenia naroży budynków (współrzędne X i Y) oraz zapewnia możliwie najwierniejsze odzwierciedlenie kształtu geometrycznego obiektu.

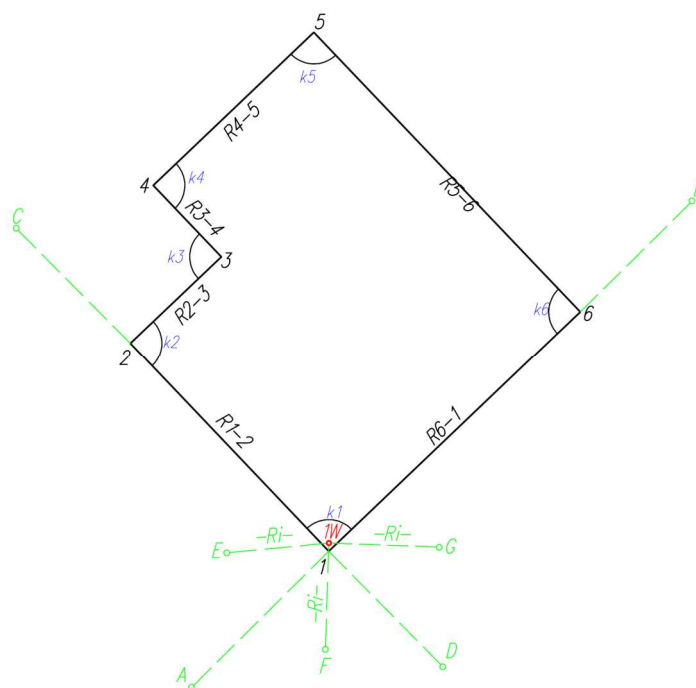
Ostatnim etapem badań dla metody *przecięcia prostych* było osiągnięcie możliwie najlepszego przybliżenia wyników skorygowanych pomiarów RTN GNSS, z zastosowaniem autorskich algorytmów, do wyników testowych pomiarów tachimetrycznych. W tym celu

opracowałem kolejny algorytm korygowania współrzędnych naroży budynku z pomiarów RTK/RTN GNSS zwany **translacją wektorów**. Wyniki tych badań zaprezentowałem w trzech publikacjach [4], [5], [6] powiązanych tematycznie. Procedura pomiarowo - obliczeniowa autorskiego algorytmu została szczegółowo opisana w artykule *Algorithm for modelling coordinates of corners of buildings determined with RTN GNSS technology using vectors translation method* [4]. Główną cechą **metody translacji wektorów** jest przyjęcie z założenia teoretycznych wartości kątów wierzchołkowych konturu budynku, to jest kątów prostych, identycznie jak w metodzie *połowy kąta*. Wynika to z faktu, że metoda *połowy kąta* jest jednym z elementów składowych całego **algorytmu translacji wektorów**. Powstałe różnice w wartościach kątowych służą do obliczenia nowych współrzędnych X, Y naroży budynku metodą *połowy kąta* w kierunku głównym i powrotnym, uzyskując w ten sposób wektory dL_i między nowo obliczonymi punktami, a wartościami współrzędnych punktów otrzymanych z klasycznej metody *przecięcia prostych*. Wykonywanie obliczeń w kierunku głównym i powrotnym uzasadnione jest potrzebą zminimalizowania przenoszenia się błędów (zgodnie z prawem przenoszenia się błędów) wynikających z uzyskanych odchyłek kątów w punktach wierzchołkowych budynku względem ich teoretycznych wartości, czyli kątów 90^0 . W dalszym trybie postępowania wyznacza się kolejne położenie naroży budynku. Tym razem są to punkty powstałe z przecięcia prostych sąsiednich lic ścian budynku utworzonych z nowo obliczonych punktów dla kierunku głównego i powrotnego. Następnie ponownie dokonujemy obliczenia (ze współrzędnych X, Y) kątów wierzchołkowych w nowo powstałych (z kierunku głównego, powrotnego i przecięcia prostych sąsiednich lic ścian budynku) narożnikach obiektu i na podstawie uzyskanych odchyłek (w stosunku do kątów prostych) oblicza się wagi do nowo obliczonych współrzędnych punktów – narożników budynku. Końcowym etapem **algorytmu translacji wektorów** jest obliczenie średnich ważonych współrzędnych naroży budynku oraz, w efekcie finalnym, dokonanie korekty ich położenia z wykorzystaniem metody *sumy wektorów*. Graficzną prezentację realizacji algorytmu przedstawiłem na rysunku 3 (ogólny schemat) oraz na rysunkach szczegółowych 3.1-3.9. Rysunki te ilustrują przykładowe obrazy obiektu (budynku), w którym geometria i wzajemne relacje poszczególnych elementów (lica ścian, kąty proste, itp.) zostały mocno zdeformowane w celu lepszej wizualizacji opisywanego algorytmu.

Algorytm **translacji wektorów**:

1. Po wykonaniu pomiaru punktów bazowych *A, B, C, D itd.* i obliczeń z przecięcia prostych otrzymujemy współrzędne X, Y naroży budynków 1-6 (Rys. 3).

2. Dla jednego z punktów (*narożnika nr 1*) wykonujemy pomiar wcięciem liniowym (punkty bazowe: E, F, G) z obserwacjami nadliczbowymi i obliczamy współrzędne X, Y tego punktu metodą najmniejszych kwadratów, otrzymując nowe położenie punktu numer *IW*. Przyjmujemy położenie tego punktu jako niezmiennie w stosunku do pozostałych wyznaczanych naroży budynku. Dokonując wyboru właściwego punktu (*narożnika*), należy kierować się możliwie najlepszymi warunkami pomiarowymi dla punktów bazowych wyznaczanych w trybie RTN GNSS, z których realizujemy wcięcie liniowe (Rys. 3).
3. Na podstawie uzyskanych współrzędnych punktów *1-6* z przecięcia prostych, obliczamy kąty wierzchołkowe narożników budynku k_1-k_6 (Rys. 3).
4. Obliczamy odchyłkę kątową w każdym narożniku budynku $f_k = k_i - 100^g$
5. Obliczamy poprawkę kątową dla kierunków przecinających się sąsiednich ścian w każdym narożniku budynku $v_k = \frac{-f_k}{2}$

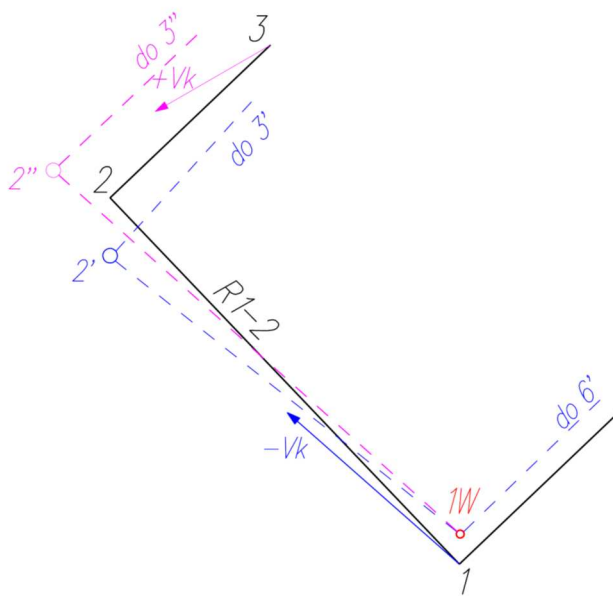


Legenda:

- A, B, C, D, E, F, G, ...* - punkty bazowe pomierzone technologią RTN GNSS
- 1-6* - punkty (narożniki budynku) wyznaczone w sposób pośredni z metody *przecięcia prostych* punktów bazowych *A, B, C, D, ...*, pomierzonych w trybie RTN GNSS
- R1-2 – R6-1* - długości równe czołówkom dla każdego lica ściany budynku
- Ri* - miary liniowe z punktów bazowych *E, F, G* dla metody *wcięcia liniowego* do narożnika budynku przyjętego jako punkt niezmienny
- IW* - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni z metody *wcięcia liniowego* z punktów bazowych *E, F, G* pomierzonych w trybie RTN GNSS
- k1-k6* - kąty wierzchołkowe w narożnikach budynku wyznaczone na podstawie współrzędnych X, Y punktów *1-6*

Rys. 3. Graficzne przedstawienie elementów mierzonych i liczonych do metody *translacji wektorów*.

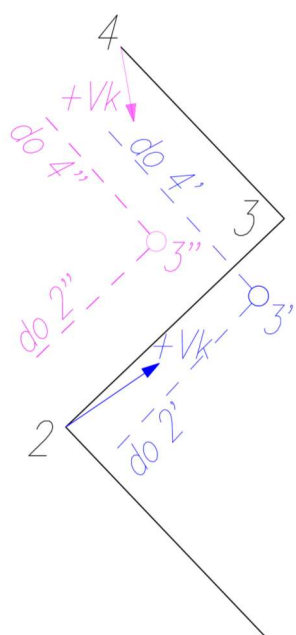
6. Z narożnika budynku nr 1 powstałego z przecięcia prostych A, B, C, D wykonujemy obliczenia współrzędnych X i Y kolejnego punktu - nr 2' - wykorzystując współrzędne X i Y punktu biegunowego (narożnika 1) oraz współrzędne biegunowe, czyli kąt równy $v_k = \frac{-f_k}{2}$ wraz z długością równą czołówce R_{1-2} (Rys. 3.1). Zmierzając w stronę zgodną z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, wykonujemy te same czynności na każdym kolejnych punktach biegunowych (2, 3, 4, 5), uzyskując nowe położenie (współrzędne X, Y) narożników budynku – 3', 4', 5', 6' (Rys. 3.2-3.5). W tym miejscu należy zwrócić uwagę na znak poprawki kątowej v_{ki} – odkładając kąt od prostej nawiązania na sąsiedni punkt (narożnik) zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara przyjmujemy znak „+” a w przeciwnym kierunku znak „-”. Zgodnie z założeniem opisanym w punkcie 2 (o niezmienności położenia narożnika nr 1W), gdy dochodzimy do punktu początkowego 1, już nie obliczamy jego nowych współrzędnych.



Legenda dla rys. 3.1-3.5

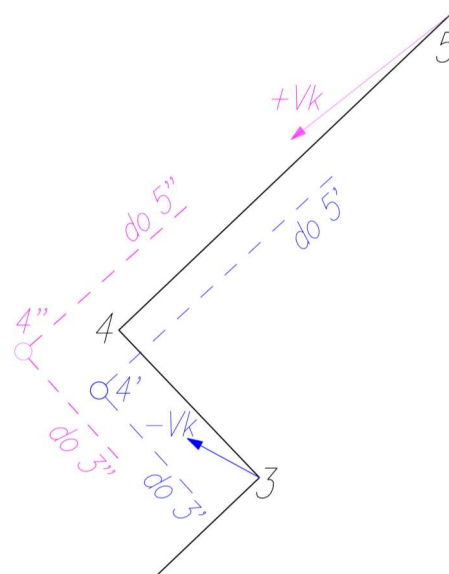
- 1-6** - punkty (narożniki budynku) wyznaczone w sposób pośredni z metody *przecięcia prostych* punktów bazowych pomierzonych w trybie RTN GNSS
- 2'- 6'** - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą *połowy kąta* w kierunku głównym
- 2''- 6''** - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą *połowy kąta* w kierunku powrotnym
- R1-2, ...** - długości równe czołówkom dla każdego lica ściany budynku
- 1W** - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni z metody *wcięcia liniowego* z punktów bazowych pomierzonych w trybie RTN GNSS
- Vk** - poprawka kątowa wyznaczona dla kierunków sąsiednich przecinających się ścian w każdym narożniku budynku

Rys. 3.1. Wyznaczenie współrzędnych X, Y narożnika budynku 2' w kierunku głównym i 2'' w kierunku powrotnym



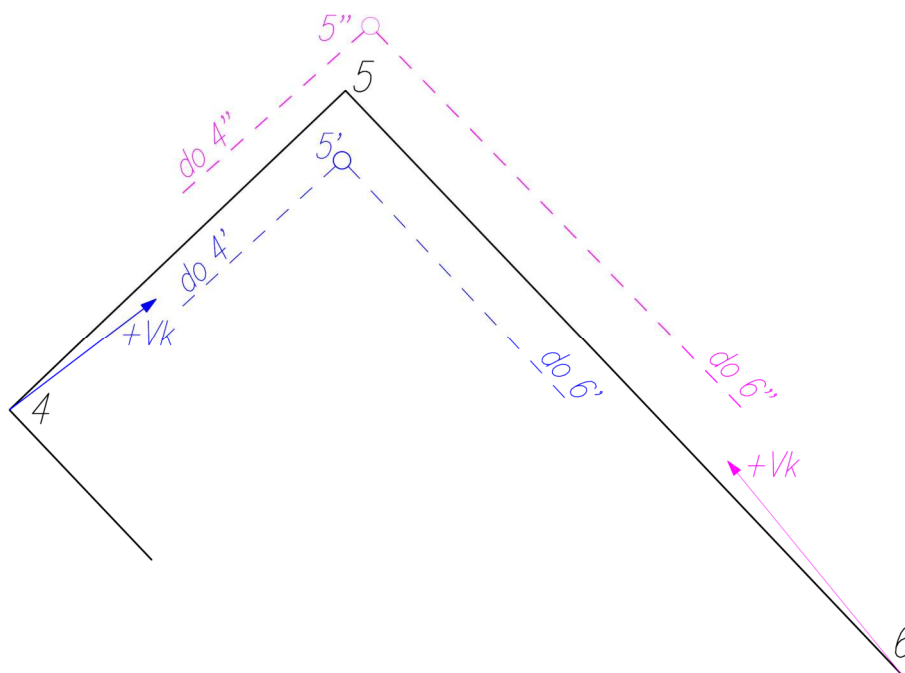
Rys. 3.2.

Wyznaczenie współrzędnych X, Y narożnika budynku 3' w kierunku głównym i 3'' w kierunku powrotnym

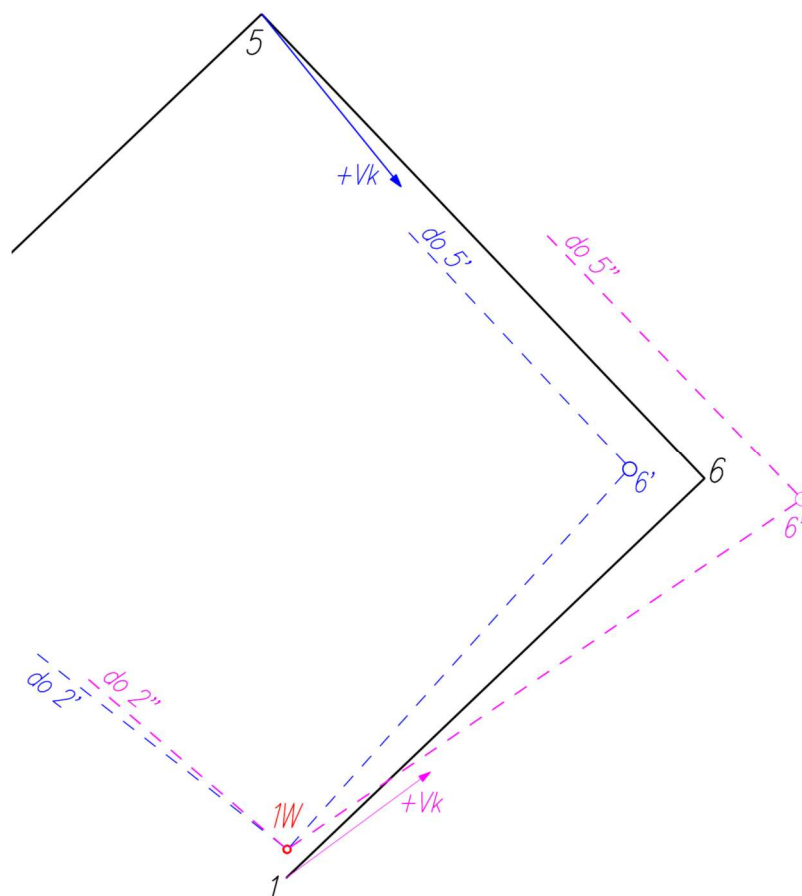


Rys. 3.3.

Wyznaczenie współrzędnych X, Y narożnika budynku 4' w kierunku głównym i 4'' w kierunku powrotnym

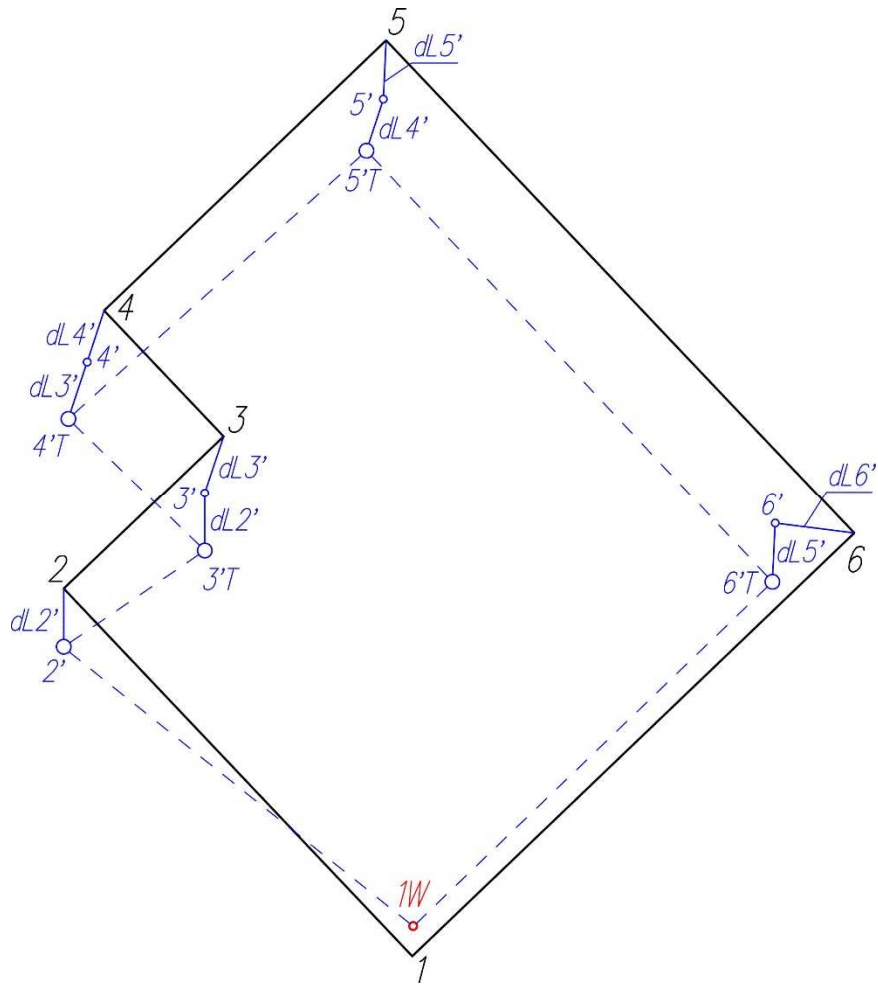


Rys. 3.4. Wyznaczenie współrzędnych X, Y narożnika budynku 5' w kierunku głównym i 5'' w kierunku powrotnym



Rys. 3.5. Wyznaczenie współrzędnych X, Y narożnika budynku 6' w kierunku głównym i 6'' w kierunku powrotnym

7. Czynności wymienione w punkcie 6 powtarzamy w stronę przeciwną do kierunku ruchu wskazówek zegara, uzyskując dla każdego narożnika budynku nowe współrzędne, które oznaczamy 6'', 5'', 4'', 3'', 2'' (Rys. 3.1-3.5).
8. W ten sposób uzyskaliśmy podwójne położenie budynku – z kierunku głównego (2'-6') i powrotnego (6''-2''). Dla każdego z tych położen wspólnym ogniwem jest punkt (narożnik) nr 1W przyjęty jako niezmienny (założenie z punktu 2).



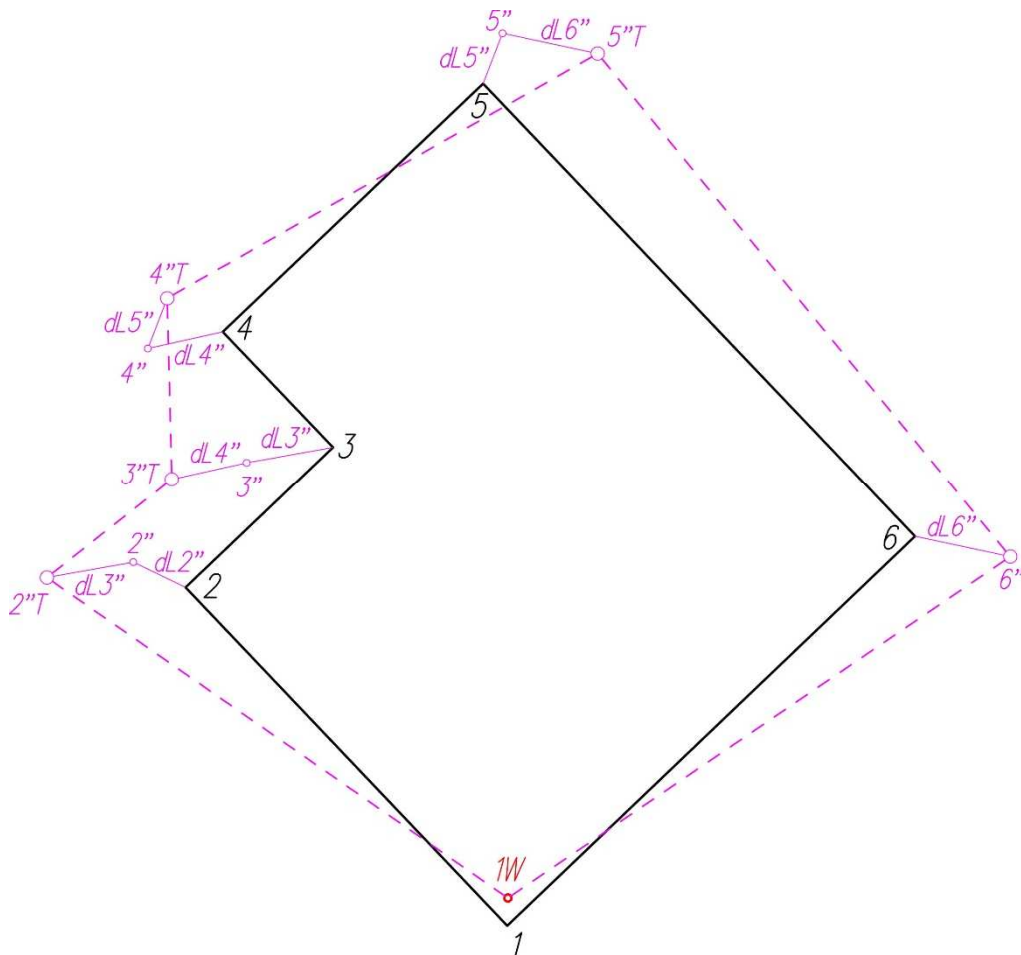
Legenda:

- 1-6** - punkty (narożniki budynku) wyznaczone w sposób pośredni z metody przecięcia prostych punktów bazowych pomierzonych w trybie RTN GNSS
- 2'-6'** - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą połowy kąta w kierunku głównym
- 1W** - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni z metody wcięcia liniowego z punktów bazowych pomierzonych w trybie RTN GNSS
- dL2'-dL6'** - wektory od nowo powstałych punktów z kierunku głównego (2'-6') względem narożników 2-6 otrzymanych z przecięcia prostych punktów bazowych
- 3'T-6'T** - punkty (narożniki budynku) powstałe w wyniku translacji wektorów otrzymanych z relacji punktów poprzedzających (2-6 względem 2'-6')

Rys. 3.6. Translacja nowopowstałych punktów w kierunku głównym o długość wektora dL_i'

9. Wyznaczane są wektory dL_i (od dL_2' do dL_6' – rysunek 3.6 oraz od dL_6'' do dL_2'' – rysunek 3.7) od nowo powstałych punktów z kierunku głównego (2'-6') – rysunek 3.6 - i powrotnego (6''-2'') – rysunek 3.7 - względem punktów 2-6 (narożników) otrzymanych z przecięcia prostych A, B, C, D itd. Dla każdego nowo powstałego narożnika i' budynku, dla kierunku głównego, dokonujemy translacji o wektor dL_{i-1} należący do punktu poprzedniego $i-1$, uzyskując kolejny raz nowe położenie narożnika budynku, a dla kierunku

powrotnego translacja jest dokonywana o wektor dL_{i+1} . W wyniku translacji otrzymujemy punkty $i''T$ dla kierunku głównego oraz $i''T$ dla kierunku powrotnego. Czynności opisane w tym punkcie nie dotyczą pierwszego punktu w kierunku głównym ($2'$) i powrotnym ($6''$) gdyż wektor punktu poprzedniego względem nich, czyli punktu niezmiennego $1W$, przyjęty jest na poziomie zerowym.



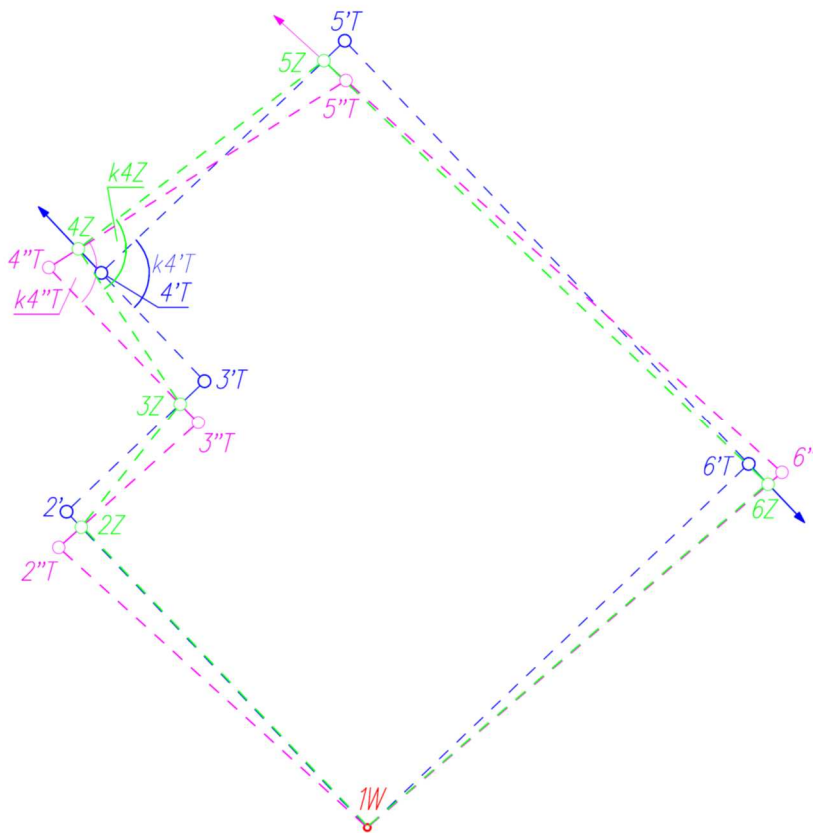
Legenda:

- 1-6** - punkty (narożniki budynku) wyznaczone w sposób pośredni z metody *przecięcia prostych* punktów bazowych pomierzonych w trybie RTN GNSS
- 6''-2''** - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą *połowy kąta* w kierunku powrotnym
- 1W** - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni z metody *wcięcia liniowego* z punktów bazowych pomierzonych w trybie RTN GNSS
- $dL6''-dL2''$** - wektory od nowo powstałych punktów z kierunku powrotnego ($6''-2''$) względem narożników $6-2$ otrzymanych z przecięcia prostych punktów bazowych
- $5''T-2''T$** - punkty (narożniki budynku) powstałe w wyniku translacji wektorów otrzymanych z relacji punktów poprzedzających ($6-2$ względem $6''-2''$)

Rys. 3.7. Translacja nowo powstałych punktów w kierunku powrotnym o długość wektora dLi''

10. Kolejną czynnością jest obliczenie współrzędnych X, Y przecięcia prostych, które stanowią dwie sąsiadujące ze sobą lica ścian budynku. W każdym przypadku prostą podstawową

generują dwa punkty (narożniki), wyznaczone w kierunku głównym po translacji, np. prosta $2'-3'T$. Natomiast prosta tnąca realizowana jest przez dwa narożniki po translacji, należące do ściany sąsiedniej, wyznaczone w kierunku powrotnym np. $4''T-3''T$ (Rys. 3.8). W ten sposób otrzymujemy kolejne, już trzecie po translacji, położenie narożników budynku oznaczone symbolem Z (np. $3Z$). Na tym etapie dysponujemy trzema położeniami każdego narożnika budynku: z kierunku głównego ($2'$ oraz od $3'T$ do $6'T$) i powrotnego ($6''$ oraz od $5''T$ do $2''T$) oraz z przecięcia prostych (od $2Z$ do $6Z$). Obliczenia współrzędnych X , Y przecięcia prostych nie muszą być wykonywane dla pierwszego punktu w kierunku głównym ($2'$) i powrotnym ($6''$) – uzasadnienie w punkcie 13 algorytmu.



Legenda:

- $2', 6''$ - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą *połowy kąta* w kierunku głównym ($2'$) i powrotnym ($6''$)
- $3'T-6'T$ - punkty (narożniki budynku) powstałe w wyniku translacji wektorów w kierunku głównym
- $5''T-2''T$ - punkty (narożniki budynku) powstałe w wyniku translacji wektorów w kierunku powrotnym
- $2Z-6Z$ - punkty (narożniki budynku) powstałe z przecięcia sąsiednich lic ścian budynku, utworzonych z nowo obliczonych punktów dla kierunku głównego i powrotnego
- $k4't, k4''t, k4Z$ - kąty wierzchołkowe (przykładowo dla narożnika nr 4) obliczone ze współrzędnych nowo powstałych punktów
- $1W$ - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni z metody *wcięcia liniowego*, z punktów bazowych pomierzonych w trybie RTN GNSS

Rys. 3.8. Wyznaczenie położenia narożników budynków (NrZ) z przecięcia prostych (lica ścian budynku) wygenerowanych w kierunku głównym i powrotnym

11. W celu uzyskania jednoznacznego położenia punktu (najbardziej prawdopodobnych współrzędnych X i Y) wykonujemy obliczenia średniej ważonej położenia narożnika budynku.
12. Z uzyskanych współrzędnych punktów nowo powstałych po translacji, obliczamy ponownie kąty wierzchołkowe narożników budynku k' , k'' , kZ (dla przykładu z rysunku 3.8 są to kąty: $k4'T$, $k4''T$, $k4Z$), niezależnie dla każdego wariantu a , b , c (rys. 3.8):
- z kierunku głównego: $1W-2'-3'T-4'T-5'T-6'T-1W$,
 - z kierunku powrotnego: $1W-6''-5''T-4''T-3''T-2''T-1W$,
 - z przecięcia prostych lica ścian budynku: $1W-2Z-3Z-4Z-5Z-6Z-1W$.
13. Obliczamy poprawkę kierunku $v_k = \frac{k_i - 100^g}{2}$ w każdym narożniku budynku, dla każdego z trzech – a , b , c - lub dwóch – a , b - wariantów, która będzie wykorzystana do wyznaczenia współrzędnych. Dla pierwszego punktu, zlokalizowanego po punkcie niezmiennym w kierunku głównym i powrotnym, odchyłkę kątową f_k liczymy uwzględniając w obliczeniach punkt niezmienny $1W$ a nie punkt 1 , powstały z przecięcia prostych A , B , C , D . Wyłączamy z tych obliczeń łącznie pięć narożników budynku: punkt niezmienny $1W$ oraz po dwa najbliższe punkty względem punktu niezmiennego, w kierunku głównym $2'$, $3'T$ i powrotnym $6''$, $5''T$. Uzasadnienie wyłączenia tych punktów z obliczeń przecięcia prostych jest związane z brakiem pełnej jednorodności translacji opisanych w punkcie 9: dla punktów najbliższych względem punktu niezmiennego w obu kierunkach $2'$ i $6''$ – brak translacji wektora z punktu poprzedniego, czyli niezmiennego ($1W$), a dla prostych podstawowych lub tnących wychodzących od punktów pierwszych po punkcie niezmiennym ($1W$), czyli $2'$ i $6''$, do kolejnych punktów, czyli odpowiednio $3'T$ i $5''T$ – brak translacji wektora z punktu niezmiennego $1W$ dla punktów początkowych, czyli $2'$ i $6''$ prostej podstawowej lub tnącej. Dla niniejszego przykładu (Rys. 3.8), odchyłkę f_k obliczamy tylko dla punktu $4Z$.
14. Obliczamy wagi współrzędnych dla każdego z trzech – a , b , c - lub dwóch – a , b - wariantów: $p_i = \frac{1}{v_k^2}$
15. Obliczamy współrzędne X i Y narożników budynku jako średnie ważone. W celu lepszego zrozumienia wyboru właściwych współrzędnych punktów do wagowania, wzory (4-8) przedstawiono dla konkretnego przykładu z rysunku 3.8.

$$X_{2W} = \frac{X_{2I} \cdot p_{2I} + X_{2IT} \cdot p_{2IT}}{p_{2I} + p_{2IT}} \quad Y_{2W} = \frac{Y_{2I} \cdot p_{2I} + Y_{2IT} \cdot p_{2IT}}{p_{2I} + p_{2IT}} \quad (4)$$

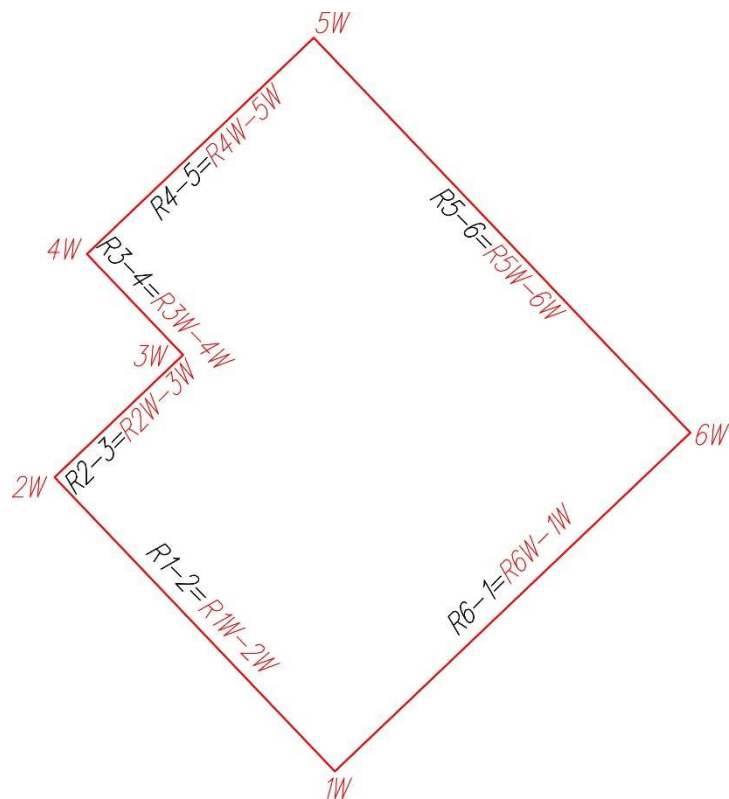
$$X_{3W} = \frac{X_{3IT} \cdot p_{3IT} + X_{3II} \cdot p_{3II}}{p_{3IT} + p_{3II}} \quad Y_{3W} = \frac{Y_{3IT} \cdot p_{3IT} + Y_{3II} \cdot p_{3II}}{p_{3IT} + p_{3II}} \quad (5)$$

$$X_{4W} = \frac{X_{4IT} \cdot p_{4IT} + X_{4II} \cdot p_{4II} + X_{4Z} \cdot p_{4Z}}{p_{4IT} + p_{4II} + p_{4Z}} \quad Y_{4W} = \frac{Y_{4IT} \cdot p_{4IT} + Y_{4II} \cdot p_{4II} + Y_{4Z} \cdot p_{4Z}}{p_{4IT} + p_{4II} + p_{4Z}} \quad (6)$$

$$X_{5W} = \frac{X_{5IT} \cdot p_{5IT} + X_{5II} \cdot p_{5II}}{p_{5IT} + p_{5II}} \quad Y_{5W} = \frac{Y_{5IT} \cdot p_{5IT} + Y_{5II} \cdot p_{5II}}{p_{5IT} + p_{5II}} \quad (7)$$

$$X_{6W} = \frac{X_{6IT} \cdot p_{6IT} + X_{6II} \cdot p_{6II}}{p_{6IT} + p_{6II}} \quad Y_{6W} = \frac{Y_{6IT} \cdot p_{6IT} + Y_{6II} \cdot p_{6II}}{p_{6IT} + p_{6II}} \quad (8)$$

16. Obliczamy czołówki z nowo wyznaczonych współrzędnych narożników budynku i porównujemy je z danymi pomiarowymi (czołówki z pomiaru). W ten sposób uzyskujemy na poszczególnych bokach (ścianach) budynku różnice w czołówkach – dR .



Legenda:

- 1W** - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni z metody wcięcia liniowego z punktów bazowych pomierzonych w trybie RTN GNSS
- 2W-6W** - punkty (narożniki budynku) powstałe po zastosowaniu pełnego algorytmu translacji wektorów (ostateczne położenie)
- R1-2 – R6-1** - miary kontrolne (czołówki) pomierzone bezpośrednio w terenie (kolor czarny)
- R1W-2W – R6W-1W** - miary kontrolne (czołówki) obliczone ze współrzędnych punktów (narożników budynku) po zastosowaniu pełnego algorytmu translacji wektorów (kolor czerwony)

Rys. 3.9. Ostateczne położenie narożników budynku po uwzględnieniu metody translacji wektorów

17. W celu wyeliminowania powstałych różnic w czołówkach dR , stosujemy metodę *sumy wektorów* otrzymując nowe i jednocześnie ostateczne położenie (współrzędne X i Y) narożników budynku – *1W-6W* (Rys. 3.9). Należy jednak zaznaczyć, że różnica dR w czołówkach na pierwszej ścianie budynku w kierunku głównym i powrotnym względem punktu niezmiennego jest modyfikowana tylko w kierunku odpowiednio głównym i powrotnym.

18. W wyniku zastosowania przedstawionego algorytmu otrzymujemy ostateczne współrzędne X, Y narożników budynku *1W-6W* oraz pełną zgodność czołówek obliczonych ze współrzędnych względem wymiarów rzeczywistych (Rys. 3.9).

W celu przeprowadzenia szczegółowej weryfikacji autorskiego algorytmu, zwanego metodą *translacji wektorów*, wykonałem eksperyment badawczy na rzeczywistym obiekcie terenowym. Próbkę badawczą obiektu stanowiły narożniki budynków jednorodzinnych i gospodarczych. Proces przeprowadzonych badań przedstawiłem w drugim artykule poświęconym tej metodzie *Innovative algorithm of vector translation method for the measurements of corners of building structures using RTN GNSS technology* [5]. Oprócz oceny porównawczej uzyskanych wyników pomiaru (współrzędne, czołówki) i określeniu częstości występowania różnic współrzędnych, przeprowadziłem analizę statystyczną badanej próbki. Wnioski z przeprowadzonego eksperymentu badawczego wskazują, że autorski algorytm *translacji wektorów* przyczynia się do znacznego zbliżenia wyników pomiarów satelitarnych do tachimetrycznych. Niektóre aspekty badawcze, jak na przykład porównanie czołówek wyznaczonych z pomiarów satelitarnych i tachimetrycznych do bezpośrednio pomierzonych, pokazują nawet większą dokładność proponowanego rozwiązania aniżeli uzyskujemy w tachimetrii (tab. 1), [5].

Tabela. 1. Różnice czołówek dR w relacji metod: tachimetrycznej (T) i przecięcia prostych z uwzględnieniem metody *translacji wektorów* (PP_{IV}).

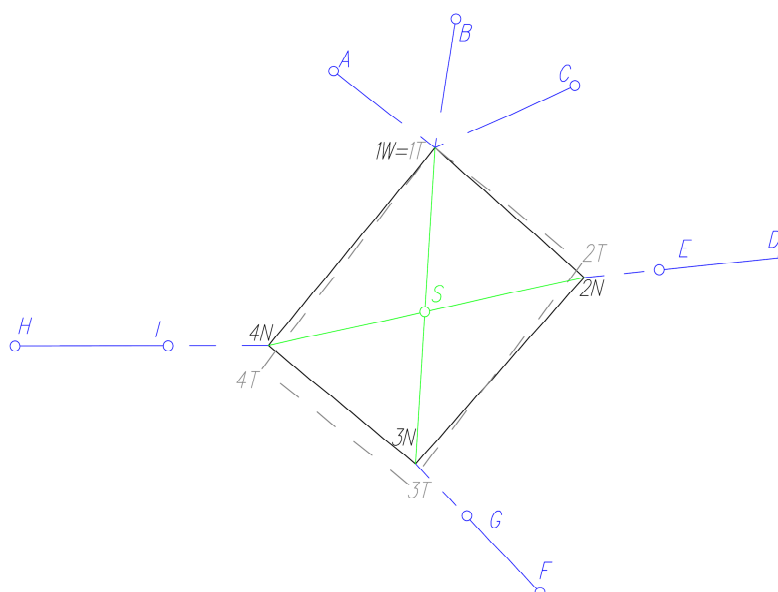
$T-R[m]$	$PP_{IV}-R[m]$	Bok
0,025	0,000	1-2
0,028	0,000	2-3
-0,017	0,000	3-4
0,019	0,000	4-1
-0,017	0,000	5-6
-0,014	0,000	6-7
0,014	0,000	7-8
0,042	-0,001	8-9
0,015	0,000	9-10
0,011	-0,001	10-11
0,009	0,000	11-12
0,006	0,000	12-5
-0,027	0,000	13-14
0,025	0,000	14-15
0,051	0,002	15-16
0,016	0,001	16-17
0,018	0,000	17-18
0,023	0,000	18-13
-0,013	0,000	19-20
-0,053	0,000	20-21
-0,009	0,000	21-22
0,000	0,000	22-19
0,018	-0,002	23-24
-0,002	-0,006	24-25
0,008	-0,003	25-26
-0,005	0,000	26-27
0,004	-0,005	27-28
-0,022	0,000	28-23
0,007	0,000	29-30
-0,008	0,000	30-31
0,021	0,000	31-32
0,003	0,000	32-29
0,004	0,000	33-34
-0,022	0,000	34-35
-0,021	0,000	35-36
0,010	0,000	36-33

Dokonując oceny przydatności pośredniej metody *przecięcia prostych*, wykorzystywanej w pomiarach RTK/RTN GNSS, do wyznaczenia naroży budynków, przeprowadziłem również dowód analityczny dotychczasowych badań. Ponieważ metoda *sumy wektorów* i *połowy kąta* są elementami składowymi metody *translacji wektorów*, cała procedura sprowadziła się do przeprowadzenia dowodu analitycznego ostatniej wymienionej metody. Wyniki przeprowadzonego dowodu zaprezentowałem w trzeciej publikacji poświęconej metodzie *translacji wektorów* *Mathematical analysis of the algorithms used in modernized methods of building measurements with RTN GNSS technology* [6]. Głównym celem tej publikacji było udowodnienie tezy, że po zastosowaniu zaproponowanych rozwiązań obliczeniowych w odniesieniu do „surowych” wyników pomiaru, zawsze osiągnie się mniejszą różnicę współrzędnych wyrównanych względem teoretycznych, od różnicy współrzędnych z „surowych” wyników pomiaru względem wartości teoretycznych. Jako wartości teoretyczne, przyjęto w dowodzie analitycznym współrzędne naroży hipotetycznego budynku zlokalizowanego w lokalnym układzie współrzędnych prostokątnych. Szczegółowo sposób określenia współrzędnych teoretycznych przedstawiłem w artykule [6]. Udowodniona tam teza tylko potwierdziła potrzebę wykorzystywania zaproponowanych algorytmów do wyznaczenia korekt wyników, uzyskanych w pomiarach RTK/RTN GNSS naroży budynków.

Ostatnim problemem naukowym powiązaniem tematycznie z wcześniej omówionymi był nowy, autorski algorytm zwany metodą *środką ciężkości*, zwiększający wiarygodność wyznaczenia naroży budynków w trybie RTK/RTN GNSS, dotyczący drugiej pośredniej metody *punktu na prostej*. Podobnie jak w poprzednich algorytmach, tak i w tym przypadku metoda *środką ciężkości* zakłada kąty proste w narożnikach budynku (zgodnie z projektem budowlanym). W związku z tym może być ona stosowana tylko i wyłącznie do obiektów, dla których przewidziano właśnie takie rozwiązania konstrukcyjne ścian budynku. Cały proces pomiarowo-obliczeniowy poparty eksperymentem doświadczalnym został scharakteryzowany w publikacji *Modyfikacja współrzędnych naroży budynku wyznaczonego w trybie RTN GNSS z zastosowaniem autorskiego algorytmu środką ciężkości NPsc* [7]. Szczegółowo tryb postępowania w algorytmie *środką ciężkości* przedstawiam poniżej:

1. Pomiar punktów bazowych (A-I) w trybie RTN GNSS (rys. 4). Punkty A, B, C stanowią podstawę pomiarową dla wyznaczenia narożnika nr 1 budynku metodą wcięcia liniowego. Współrzędne X, Y tego narożnika oblicza się metodą najmniejszych kwadratów i przyjmuje się jego położenie jako bezbłędne do dalszych postępowań pomiarowo – obliczeniowych nadając mu jednocześnie oznaczenie *1W*. Na rysunku 4 przedstawiono również narożniki budynku oznaczone *1T-4T*, wyznaczone metodą

tachimetrii, których położenie również przyjęto jako bezbłędne do dalszej analizy. Przyjęcie takiego założenia jest uzasadnione analizą przedstawioną we wcześniejszych publikacjach. Wybór narożnika IW budynku powinien być poprzedzony oceną warunków pomiarowych dla technologii w czasie rzeczywistym (odkryty horyzont, brak linii energetycznych itp.). Pozostałe punkty osnowy pomiarowej ($D-I$) stanowią pogrupowane bazy do wyznaczenia współrzędnych X i Y kolejnych narożników budynków metodą *punktu na prostej* (NP). Dla punktów tych przyjęto oznaczenia $2N$, $3N$, $4N$ (Rys. 4).



Legenda:

- A-I** - punkty bazowe pomierzone w trybie RTN GNSS
- IW** - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni z metody *wcięcia liniowego* z punktów bazowych A, B, C , pomierzonych w trybie RTN GNSS
- $1T-4T$** - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą tachimetrii
- $2N-4N$** - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą *punktu na prostej*
- S** - środek ciężkości budynku ($IW-2N-3N-4N$)

Rys. 4. Pomiar budynku w trybie RTN GNSS z wykorzystaniem pośrednich metod pomiaru: punktu na prostej i wcięcia liniowego.

2. Obliczenie współrzędnych X, Y środka ciężkości S dla narożników budynku ($IW, 2N, 3N, 4N$) (Rys.4).
3. Wykreślenie teoretycznego konturu budynku (rysunek 5 – kolor czerwony) z założeniem kątów prostych w punktach wierzchołkowych ($1R, 2R, 3R, 4R$) oraz przyjęciem długości ścian z pomiaru kontrolnego czołówek. Wykreślenie tego konturu budynku rozpoczyna się i kończy na tym samym punkcie - punkcie przyjętym za bezbłędny $IW=1R$; także orientacja pierwszego boku ($1R-2R$) pokrywa się z orientacją boku ($IW-2N$) z pomiarów satelitarnych - na rysunku 5 celowo dokonano

znieszczenia ilustracji w celu zapewnienia lepszej wizualizacji. Brak zamknięcia miary końcowej na tym samym punkcie IW (różnice współrzędnych dX i dY) traktuje się jako odchyłki współrzędnych X i Y punktu IW , czyli:

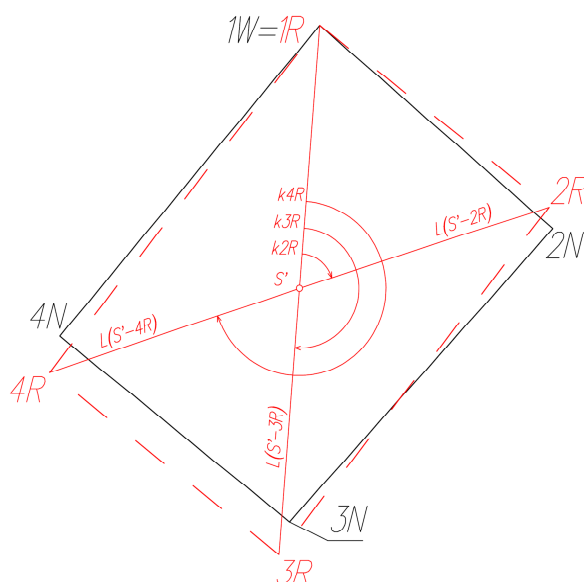
$$f_{dx} = X_{1W_p} - X_{1W_k} \quad (9)$$

$$f_{dy} = Y_{1W_p} - Y_{1W_k} \quad (10)$$

gdzie:

X_{1W_p}, Y_{1W_p} – współrzędne narożnika (teoretycznego konturu budynku) przyjętego za bezbłędny,

X_{1W_k}, Y_{1W_k} – współrzędne narożnika (konturu budynku) wyznaczonego z odkładania pod kątem prostym długości ścian budynku uzyskanych z miar kontrolnych, czyli z czołówek.



Legenda:

- IW - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni z metody *wcięcia liniowego* z punktów bazowych A, B, C, pomierzonych w trybie RTN GNSS
- $1R-4R$ - punkty (narożniki budynku) teoretycznego konturu budynku
- $2N-4N$ - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą *punktu na prostej*
- S' - środek ciężkości teoretycznego konturu budynku ($1R-2R-3R-4R$)
- k_{2R}, k_{3R}, k_{4R} - kąty obliczone ze współrzędnych punktów (narożników) teoretycznego konturu budynku
- $L_{S'-2R}, L_{S'-3R}, L_{S'-4R}$ - długości obliczone ze współrzędnych punktów (narożników) teoretycznego modelu budynku

Rys. 5. Konstrukcja teoretycznego konturu budynku

4. Otrzymane odchyłki z wzorów (9) i (10) rozrzuca się na współrzędne X i Y wszystkich wierzchołków, obliczając poprawki v_{dx_i}, v_{dy_i} zgodnie ze wzorami:

$$v_{dx_i} = -\frac{f_{dx}}{n} \cdot (i - 1) \quad (11)$$

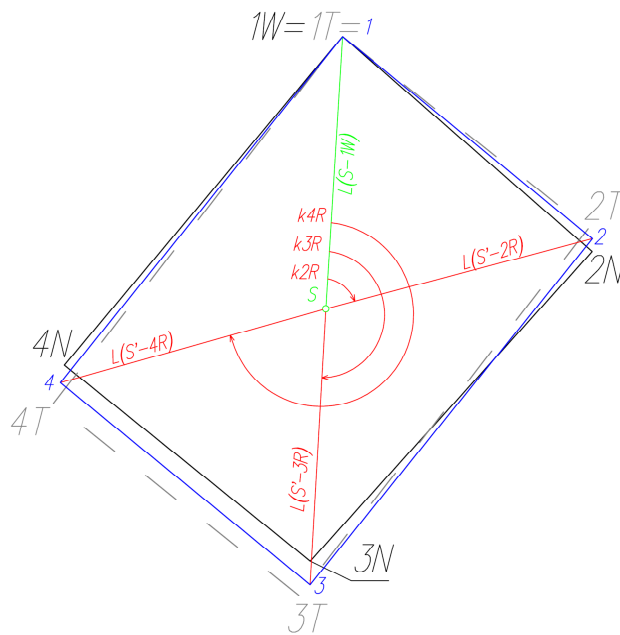
$$v_{dy_i} = -\frac{f_{dy}}{n} \cdot (i - 1) \quad (12)$$

gdzie:

n – liczba wszystkich narożników budynku,

i – kolejny numer narożnika budynku, poczynając od numeru 1 dla punktu IW przyjętego za bezbłędny.

5. Obliczenie współrzędnych X , Y środka ciężkości S' dla narożników teoretycznego konturu budynku ($1R$, $2R$, $3R$, $4R$), uwzględniającego poprawki z wzorów (11) i (12) (Rys. 5).
6. Obliczenie kątów k_{2R} , k_{3R} , k_{4R} oraz odległości $L_{S'-2R}$, $L_{S'-3R}$, $L_{S'-4R}$ ze współrzędnych X , Y teoretycznego konturu budynku (Rys. 5).



Legenda:

- IW - punkt (narożnik budynku) wyznaczony w sposób pośredni z metody wcięcia liniowego z punktów bazowych A , B , C , pomierzonych w trybie RTN GNSS
- $1T-4T$ - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą tachimetrii
- $2N-4N$ - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą punktu na prostej
- $1-4$ - punkty (narożniki budynku) wyznaczone metodą środka ciężkości $NPsc$
- S - środek ciężkości budynku ($1W-2N-3N-4N$)
- k_{2R} , k_{3R} , k_{4R} - kąty obliczone ze współrzędnych punktów (narożników) teoretycznego konturu budynku
- $L_{S'-2R}$, $L_{S'-3R}$, $L_{S'-4R}$ - długości obliczone ze współrzędnych punktów (narożników) teoretycznego konturu budynku

Rys. 6. Połączenie teoretycznego konturu budynku z obiektem rzeczywistym

7. Przeniesienie elementów geometrycznych (kątown i dłuęościi), wyliczonych w punkcie 6, na obiekt rzeczywisty (z pomiarów satelitarnych) (Rys. 6). Przyjmuje się środek ciężkości S (wyliczony z punktu 2 algorytmu) jako stanowisko, oraz bok $S-IW$ jako linię odniesienia (*kolory zielone*), od których odkłada się kąty k_{2R}, k_{3R}, k_{4R} , a następnie wzdłuż otrzymanych kierunków odkłada się dłuęościi $L_{S'-2R}, L_{S'-3R}, L_{S'-4R}$ (*kolory czerwone*). W ten sposób, metodą biegunową, uzyskano nowe współrzędne X, Y narożników budynku oznaczonych numerami 1, 2, 3, 4 (kolor niebieski).

Jak wspomniałem wcześniej praktyczna realizacja algorytmu środka ciężkości została zweryfikowana na tym samym obiekcie testowym domów jednorodzinnych jak w poprzednich przypadkach. Wnioski z przeprowadzonych badań są podobne. Prezentowany algorytm *środku ciężkości* zdecydowanie poprawia jakość (wiarygodność) uzyskiwanych rezultatów. Stopień poprawy jakości wyników można mierzyć bardzo znaczącymi zmianami wartości skorygowanych współrzędnych naroży budynku. Zdecydowana większość współrzędnych X, Y naroży budynków, po zastosowaniu metody *środku ciężkości*, różni się od wartości nominalnych (przyjętych za bezbłędne) zaledwie o kilka centymetrów i nie przekracza ± 0.10 m.

W ocenie wszystkich rozwiązań przedstawionych w cyklu publikacji powiązanych tematycznie, chciałem wyróżnić dwa wnioski wynikające z badań. Przede wszystkim podkreślić poprawę jakości przetworzonych wyników pomiaru budynków w trybie RTK/RTN GNSS, po zastosowaniu autorskich algorytmów. Przejawia się to w głównej mierze wysoką wiarygodnością współrzędnych naroży budynku oraz niezdeformowaną geometrią obiektu (zgodność czołówek ze stanem rzeczywistym). Obok szeroko omawianych zalet proponowanych rozwiązań, należy także wspomnieć o pewnych ograniczeniach opracowanych algorytmów. Najbardziej istotne ograniczenie ich stosowania dotyczy kątów wierzchołkowych w narożnikach budynku, które powinny z założenia wynosić 90^0 . Tak więc wszelkie odstępstwa od tych wytycznych uniemożliwiają wykorzystanie proponowanych rozwiązań. Drugi ważny czynnik determinujący wyniki końcowe pomiarów, to konieczność występowania odkrytego horyzontu w miejscach przeznaczonych na wyznaczenie współrzędnych punktów bazowych w trybie RTK/RTN GNSS. Niezależnie jednak od wspomnianych wad, proponowane algorytmy mogą stanowić dodatkowe rozwiązania pomiarowo-obliczeniowe stosowane w geodezji i mogą mieć charakter wspomagający. W związku z powyższym uważam, że zaproponowane autorskie algorytmy przedstawione w cyklu publikacji powiązanych tematycznie mają duże znaczenie praktyczne, gdyż mogą przyczynić się do wysokiej

wiarygodności i dokładności wyznaczania współrzędnych naroży budynków w czasie rzeczywistym.

Aby zwiększyć wydajność stosowania proponowanych rozwiązań należałoby jeszcze zainstalować oprogramowanie opisanych algorytmów w odbiornikach GNSS, tak aby korekta wyników pomiaru realizowana była bezpośrednio w terenie. W związku z tym, rozpocząłem poszukiwania potencjalnych firm, osób fizycznych lub prawnych w celu nawiązania współpracy, której wynikiem końcowym byłoby realne wykorzystanie przez geodetów w terenie moich autorskich rozwiązań, podczas bezpośrednich prac geodezyjnych. Drogą popularyzacji tych rozwiązań na szeroką skalę było zaprezentowanie ich na Międzynarodowych Targach Geoinformacyjnych INTERGEO 2015 w Niemczech. Wynikiem tamtej prezentacji jest aktualnie prowadzona współpraca z przedstawicielem Warszawskiego Przedsiębiorstwa Geodezyjnego, v-ce prezesem mgr inż. Jackiem Uchańskim, w celu realizacji pełnej automatyzacji wspomnianego procesu obliczeniowego w pomiarach geodezyjnych budynku, z wykorzystaniem technologii RTK/RTN GNSS oraz fotogrametrii. Współpraca ta ma również na celu sformalizowanie pełnego procesu technologicznego, z wykorzystaniem algorytmów przedstawionych w niniejszym opracowaniu, do zwiększenia wiarygodności i dokładności obliczenia współrzędnych prostokątnych naroży budynku, wyznaczonych metodą fotogrametryczną, w oparciu o różne źródła pochodzenia danych wejściowych. Potrzeba kompleksowego opracowania wymienionych procedur obliczeniowych wynika z konieczności zapewnienia lub przynajmniej zwiększenia, wiarygodności i dokładności położenia naroży budynków z wykorzystaniem metod fotogrametrycznych oraz pomiarów w trybie RTK/RTN GNSS. Taki tryb kompilacji różnych technologii pomiarowych jest stosowany w związku z prowadzoną na szeroką skalę modernizacją ewidencji gruntów i budynków w ramach Zintegrowanego Systemu Informacji o Nieruchomościach.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo badawczych

5.1. Działalność prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora

Z dniem 1 października 1996 roku zostałem zatrudniony na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie, na stanowisku asystenta. Moją aktywność naukową zainicjowałem publikacją z powiązaną tematycznie z obronioną pracą magisterską. W kolejnych miesiącach pracy zdobyłem doświadczenia w zakresie wykonywania

i opracowania pomiarów sygnałów GPS, biorąc udział w pierwszej dużej kampanii pomiarowej Żywiec-Wschód a potem Żywiec-Zachód. W następnych latach, to jest od 2001 roku, również uczestniczyłem w wielu pomiarach wykonywanych za pomocą technologii GPS, z tytułu prowadzenia działalności gospodarczej w dziedzinie geodezji i kartografii. Wszystkie prace były realizowane w ramach prac zleconych wchodzących w zakres tak zwanych opracowań wykonanych na zamówienie organów władzy publicznej, samorządu terytorialnego, podmiotów realizujących zadania publiczne lub przedsiębiorców. Pełny wykaz tych prac znajduje się w załączniku 3 (pkt III.M). Wszystkie te doświadczenia zdobyte w ramach prac terenowych z wykorzystaniem nowoczesnej technologii pomiarowej GPS, pozwoliły mi na precyzowanie zainteresowań badawczych w obrębie optymalnego wykorzystania pomiarów opartych na odbiorze sygnałów satelitarnych, przy realizacji typowych zadań geodezyjnych. Jednym z pierwszych samodzielnych badań związanych z wykorzystaniem technik satelitarnych w pomiarach geodezyjnych było przeprowadzenie w 1999 roku, testów związanych z pomiarem i obliczeniem osnowy szczegółowej III klasy, różnymi metodami GPS. Realizację tego projektu wykonałem w ramach badań własnych nr 10.10.150.337 (wykaz wszystkich badań własnych znajduje się w podsumowaniu bieżącego podrozdziału). Zasadniczym celem badań było porównanie dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów osnowy szczegółowej III klasy w układzie państwowym 1965, przy zastosowaniu różnych technologii pomiarów satelitarnych GPS.

Kolejne badania skierowałem w stronę optymalizacji wykorzystywania najnowszej technologii pomiarowej RTK GPS w typowych praktycznych pomiarach geodezyjnych, jakimi są pomiary szczegółów sytuacyjnych. W tym celu przeprowadziłem w 2001 roku pomiary doświadczalne, na kolejnym rzeczywistym obiekcie testowym (zaprojektowana, założona i pomierzona sieć testowa na Błoniach w Krakowie). Prace zrealizowałem w ramach badań własnych o nr 10.10.150.553. Oprócz analizy dotyczącej problematyki dokładnościowej pomiarów satelitarnych RTK GPS, przeprowadziłem także różne analizy geometryczne i ilościowe punktów dostosowania, w wyniku których zwróciłem także uwagę na optymalne warunki związane z liczbą i lokalizacją tych punktów w przypadku transformacji.

Moje dalsze badania były skierowane na bezpośrednie wykorzystanie technologii RTK GPS w pomiarach sytuacyjno-wysokościowych, w kontekście wymaganych dokładności i optymalizacji pomiarów. W tym celu przeprowadziłem w 2002 i 2003 roku pomiary testowe w ramach kolejnych badań własnych nr 10.10.150.598. Dotyczyły one bezpośrednio porównania metody klasycznej pomiaru szczegółów sytuacyjnych z metodą satelitarną RTK

GPS. Przedmiotem przeprowadzonych badań była analiza dokładnościowa uzyskanych wyników pomiarów, a także propozycja pomiarów szczegółów terenowych trudno dostępnych.

Wynikiem wyżej wymienionych prac badawczych były publikacje przedstawione w załączniku nr 3 (pkt II.E., *Publikacje, pozycje 1, 2, 3, 4*).

Wykaz przeprowadzonych prac badawczych – badania własne:

1. Nr badań 10.10.150.337 *Analiza porównawcza wyników obliczeń testowej osnowy szczegółowej III klasy pomierzonej różnymi metodami GPS* – 1999 r.
2. Nr badań 10.10.150.553 *Optymalizacja pomiarów satelitarnych RTK GPS przy pomiarze szczegółów sytuacyjnych* – 2001 r.
3. Nr badań 10.10.150.598 *Porównanie metody klasycznej pomiaru szczegółów sytuacyjnych z metodą satelitarną RTK GPS* – 2002 r.
4. Nr badań 10.10.150.656 *Badania nad aplikacją pomiarów satelitarnych DGPS w procesie aktualizacji map numerycznych* – 2003 r.

5.2.Działalność prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora

W czerwcu 2004 roku obroniłem pracę doktorską nt. *Zastosowanie RTK GPS do pomiarów wykonywanych w celu opracowania map wielkoskalowych*, w której zawarłem wyniki dotychczasowych moich badań nad wykorzystaniem metody pomiaru szczegółów terenowych w czasie rzeczywistym, prezentując optymalizację takich pomiarów, a także proponując pewną hierarchię stosowania pośrednich metod wyznaczania szczegółów trudno dostępnych z wykorzystaniem technologii RTK GPS, z zachowaniem obligatoryjnych norm dokładnościowych. W tym samym roku, w zespole badawczym (Krzyżek R., Kudrys J., Blezień J.) przeprowadziłem eksperymentalne pomiary w trybie RTK z wykorzystaniem poprawek ze stacji KRAW, udostępnianych przez sieć Internet. Poprawki te przesyłane były do serwera BKG, za pomocą oprogramowania wykorzystującego standard Ntrip, a stamtąd udostępniano je zarejestrowanym użytkownikom. Badania te miały na celu przetestowanie funkcjonowania stacji KRAW, która od roku 2003 brała udział w projekcie pilotażowym EUREF-IP (http://www.epncb.oma.be/projects/euref_IP/euref_IP.html). Wraz z ciągłym doskonaleniem technologii pomiarów GPS, rozpocząłem testowanie pomiarów w czasie rzeczywistym, powiązanych z bezpośrednią wizualizacją wyników obserwacji. W wyniku tego powstało szereg publikacji, dotyczących wykorzystania graficznych elektronicznych rejestratorów polowych w pomiarach bezpośrednich i do tworzenia mapy numerycznej (*Załącznik 3, pkt II.E.*,

Publikacje, pozycje: 6, 7, 9). Przedstawiałem także praktyczne aspekty wykorzystywania pomiarów w czasie rzeczywistym z zastosowaniem odbiorników GPS konkretnych producentów w realizacji typowych prac geodezyjnych, jak np. wykonanie mapy do celów projektowych (*Załącznik 3, pkt II.E., Publikacje, pozycje: 10, 11*). Uruchomienie w czerwcu 2008 roku sieci stacji permanentnych ASG-EUPOS pozwoliło na kolejne badania z zastosowaniem technologii RTK GPS, weryfikujące funkcjonowanie systemu w aspekcie uzyskiwanych dokładności i ich powiązania z dotychczasową metodą pomiaru w czasie rzeczywistym opartą o dwa odbiorniki GPS. W ramach tych badań powstał artykuł, którego współautorem jest dr hab. inż. Jacek Kudrys, (*Załącznik 3, pkt II.E., Publikacje, pozycja 14*), zaprezentowany na Ogólnopolskiej Konferencji w Warszawie na temat: *Satelitarne metody wyznaczania pozycji we współczesnej geodezji i nawigacji*, zorganizowanej w Wojskowej Akademii Technicznej. W artykule tym analizowane są dokładności uzyskanych wyników pomiarów w ustalonych szeregach czasowych, w zależności od rodzaju wykorzystanych poprawek oraz liczby stacji ASG-EUPOS. Ponieważ producenci odbiorników GPS stwarzają coraz to nowsze i doskonalsze algorytmy rozwiązań w swoich produktach, postanowiłem wykonać kolejny eksperyment badawczy. Jego celem był pomiar punktów (ekscentrów stacji permanentnej KRAW) w trybie RTK GPS przy użyciu dwóch odbiorników GPS różnych producentów i zweryfikowanie uzyskanych rezultatów. Niewielkie różnice uzyskanych współrzędnych punktów badawczych w różnych interwałach i cyklach czasowych sugerują, że jednokrotny pomiar punktu w trybie RTK GPS spełnia kryteria dokładnościowe określone w Rozporządzeniu MSWiA z dnia 9 listopada 2011 roku w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego. Wyniki tych badań przedstawiłem w publikacji, których współautorem jest dr inż. Bogdan Skorupa (*Załącznik 3, pkt II.E., Publikacje, pozycja 15*). Dalsze moje prace oparte były na kolejnych badaniach pomiarów w czasie rzeczywistym. W pomiarach geodezyjnych, z wykorzystaniem technologii RTK GPS, zawsze musi mieć miejsce komunikacja między odbiornikiem ruchomym a stacją referencyjną. Każdorazowa utrata takiej łączności zawsze wymaga kolejnych inicjalizacji pomiaru, co znacznie utrudnia płynność ich realizacji. W bardzo niedalekiej przeszłości zapowiedziano rozwój „udoskonalonej technologii” pomiarowej RTK GPS, zwanej technologią RTX. Szczególnym jej rozwiązaniem jest technologia satelitarna Trimble RTX. Umożliwia ona wykorzystanie funkcji tzw. Trimble xFill dla nowej techniki pomiarowej RTK i VRS, która daje możliwości kontynuowania pomiarów nawet w sytuacji, gdy podstawowy strumień korekty RTK lub VRS

jest niedostępny. W ten sposób możliwe jest „wypełnienie” w sposób ciągły korekty RTK lub VRS do pięciu minut po utracie połączenia z podstawowym źródłem korekty. Dzięki uprzejmości firmy Geotronics Polska Sp. z o. o., autoryzowanego dystrybutora marki Trimble, dokonałem szeregu badań doświadczalnych z wykorzystaniem odbiornika Trimble R10 i zbadałem praktyczne możliwości jakie daje stosowanie m.in. funkcji Trimble xFill w Polsce. Wnikliwa analiza wszystkich badań była podstawą do wyciągnięcia konkretnych wniosków i ewentualnych rozwiązań dotyczących funkcjonowania technologii RTK-RTX GNSS w szerokim zakresie jej wykorzystania, w aspekcie praktycznej realizacji zadań geodezyjnych. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów powstały dwa artykuły (*Załącznik 3, pkt II.E., Publikacje, pozycje: 16, 17*).

Wyniki dotychczasowych badań oraz ciągłe poszukiwanie coraz to doskonalszych rozwiązań technologicznych, podnoszących wiarygodność wyników pomiaru szczegółów terenowych z wykorzystaniem technologii w czasie rzeczywistym, pozwoliły na pewną zmianę ukierunkowania prowadzonych badań, które stanowiły główny nurt tematyczny pracy habilitacyjnej, opisany w rozdziale nr 4.

Podczas realizacji eksperymentów badawczych, związanych z tematyką habilitacyjną, prowadziłem również inne badania związane z pomiarami w czasie rzeczywistym. Jednym z takich badań było analizowanie dokładności pomiarów w trybie RTN GNSS podczas pomiarów sytuacyjno-wysokościowych na punktach kontrolnych. Wyniki tych prac zostały zawarte w monografii (*Załącznik 3, pkt II.E., Monografie, pozycja 6*). W badaniach wykonano pomiary punktów kontrolnych na obiekcie testowym w kilku wariantach. Wykonano kombinacje obliczeniowe w zależności od wyboru stacji permanentnej (*ASG EUPOS lub fizyczna stacja referencyjna*), układu odwzorowawczego (*2000 lub 1965*), a także od sposobu uzyskiwania współrzędnych odniesienia punktów kontrolnych. Wyniki eksperymentu badawczego wskazują na istotne rozbieżności weryfikacji położenia punktów kontrolnych w zależności od wariantu pomiarowego.

Kolejne badania związane z dokładnością pomiarów geodezyjnych realizowanych w czasie rzeczywistym dotyczyły określenia średniego błędu położenia punktu granicznego, mierzonego przy użyciu klasycznych technologii, ale w odniesieniu do osnowy podstawowej, realizowanej przez sieć stacji permanentnych ASG EUPOS. Inspiracją do podjęcia takiego zagadnienia była nowelizacja aktów prawnych, a mianowicie Rozporządzenia Ministra Administracji i Cyfryzacji z dnia 29 listopada 2013 roku *zmieniające rozporządzenie w sprawie ewidencji gruntów i budynków* w relacji do Rozporządzenia Rady Ministrów w *sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych* z 2012 roku. W zespole badawczym (Krzyżek

R., Hanus P.) zauważyliśmy pewne nieścisłości, a nawet sprzeczności, których rozwiązanie zaproponowaliśmy w monografii (*Załącznik 3, pkt II.E., Monografie, pozycja 7*). W pracy tej został podany algorytm wyznaczenia średniego błędu położenia punktu granicznego w stosunku do osnowy podstawowej fundamentalnej 1 klasy, przy założeniu, że punkt został pomierzony metodą klasyczną (tachimetria), w nawiązaniu do punktów osnowy szczegółowej 3 klasy. Wykorzystanie zaproponowanego algorytmu oraz wykonanie pomiarów geodezyjnych z należytą rzetelnością, pozwalają na osiągnięcie wartości średniego błędu położenia punktu granicznego w stosunku do osnowy podstawowej fundamentalnej 1 klasy, nie przekraczającego ± 0.095 m. Jak wiadomo dokładność wyznaczenia szczegółu terenowego I grupy dokładnościowej nie powinna przekroczyć ± 0.10 m.

Pomiędzy wspomnianymi opracowaniami, w roku 2014, została również opublikowana (wersja elektroniczna) moja monografia doktorska *Zastosowanie RTK/RTN GNSS do pomiarów wykonywanych w celu opracowania map wielkoskalowych* (*Załącznik 3, pkt II.E., Monografie, pozycja 5*).

Dodatkowo, brałem udział w innych badaniach, zarówno indywidualnie jak i w zespołach badawczych, w wyniku których powstały monografie (*Załącznik 3, pkt II.E., Monografie, pozycje: 1, 2, 3, 4, 8, 9*) oraz publikacje (*Załącznik 3, pkt II.E., Publikacje, pozycje: 5, 9, 12, 13, 24, 25*).

Oprócz prac należących do głównego nurtu moich zainteresowań naukowo-badawczych, brałem również udział w innych przedsięwzięciach realizowanych w Zakładzie Geodezji i Kartografii (od 2007 r. Katedra Geomatyki), np. w pomiarach sieci osnowy szczegółowej III klasy na obiekcie Trzebinia.

W roku 2010 wykonałem (razem z p. dr hab. inż. Pawłem Hanusem) na rzecz AGH szczegółową ekspertyzę geodezyjno-prawną nieruchomości AGH zlokalizowanych w obrębie ulic Piastowskiej i Na Grabie (*Załącznik 3, pkt II.F i III.M*).

W roku 2015 w ramach prac wykonanych na zamówienie organów władzy publicznej, samorządu terytorialnego, podmiotów realizujących zadania publiczne lub przedsiębiorców, opracowałem dwie ekspertyzy (*Załącznik 3, pkt III.M*).

W pierwszej ekspertyzie brałem udział w pracach terenowych (pomiar), realizujących komparację dalmierza (łącznie mój udział w całej ekspertyzie wynosi 33 %). W drugiej ekspertyzie brałem udział w pełnej analizie i opracowaniu dokumentacji na rzecz zleceniodawcy razem z p. dr hab. inż. Piotrem Banasikiem, prof. nadzw. AGH (łącznie mój udział w całej ekspertyzie wynosi 50%).

