

Czy robot zastąpi geodetę?

Być może już niedługo roboty – niemające jednak wiele wspólnego z maszynami z książek i filmów fantastycznych – zaczną wspomagać geodetów w ich zadaniach.

Dariusz Andrzejewski
Damian Czekaj

Od przeszło siedemdziesięciu lat pisarze science fiction wieszczą rychłe pojawienie się robotów, mających wyręczać człowieka we wszelkiej pracy. Czy zapowiadana rewolucja w końcu nadejdzie? I czy swoim zasięgiem obejmie również geodezję?

Przeprowadzony przez nas eksperyment z zakresu robotyki mobilnej i skaningu laserowego odbył się we współpracy zaproponowanej przez Artura Adamka, pracownika Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, z zespołem kierowanym przez dr. Janusza Będkowskiego z Instytutu Automatyki i Robotyki Wydziału Mechatroniki PW. Zespół ten prowadzi badania nad rozwojem oprogramowania umożliwiającego w pełni autonomiczne działanie naziemnych robotów mobilnych. Za cel postawił sobie tak przygotować system operacyjny robota mobilnego,

aby ten mógł realizować zadania bez jakiegokolwiek udziału ludzkiego operatora. My natomiast skupiliśmy się na zbadaniu dokładności działania jednego z elementów tego systemu – algorytmu 6D SLAM.

• Czym jest zatem algorytm 6D SLAM?

Jest sposobem rozwiązania zagadnienia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), czyli techniki służącej do nawigacji jednostek autonomicznych, polegającej na równoczesnym budowaniu modelu otoczenia i określeniu względem niego aktualnej pozycji robota.

W swoim założeniu SLAM ma zapewnić robotom pełną autonomiczność. Robot w zupełnie obcym dla siebie środowisku miałby się zorientować, zbadać otoczenie, podjąć decyzje co do swojego dalszego zachowania, ominąć napotkane przeszkody i wykonać powierzone zadanie. Wszystko to niezależnie od zewnętrznych systemów lokalizacyjnych. Aby tak się jednak stało, algorytmy ste-



Robot mobilny ze skanerem laserowym w trakcie pracy

rowania oraz współpracujące z nimi systemy wizyjne (np. skaner) muszą dawać w czasie rzeczywistym pełną i wysokiej jakości informację o położeniu robota i jego otoczeniu.

Autonomiczne jednostki mobilne mogłyby wówczas znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie z powodzeniem stosowane są obecnie roboty teleoperowane (sterowane przez operatora za po-

mocą stacji dowodzenia), czyli w celach zwiadowczych, interwencyjnych czy poszukiwawczo-ratunkowych. Służyć mogłyby do transportu sprzętu militarnego, poszukiwania i rozbrajania niebezpiecznych materiałów (w tym materiałów wybuchowych) oraz do utylizacji i zabezpieczania odpadów. Współczesne roboty mobilne bardzo dobrze sprawdzają się w zadaniach eksploracyjnych i poszuki-



Mierzony blok w Kłominie, dawniej bazie wojsk radzieckich

wawczo-ratunkowych (m.in. na terenach objętych katastrofą), a także w misjach naukowych, takich jak badanie dna oceanicznego. Dlatego można domniemywać, że autonomiczne jednostki poradziłyby sobie z tymi zadaniami równie dobrze, a nawet lepiej.

• Jak to wygląda w praktyce?

Robot może rejestrować otoczenie za pomocą różnych technik. W przypadku naszej pracy z platformą mobilną Pioneer 3-AT (robotem) zintegrowany został skaner laserowy Z+F Imager 5010. Jednostka robotyczna rejestrowała więc chmury punktów, które wraz z wbudowanymi w robota czujnikami brały udział zarówno w budowie modelu otoczenia, jak i w procesie wyznaczenia położenia platformy mobilnej. Kolejne kroki algorytmu przebiegają następująco:

1. Robot rejestruje swoją wyjściową pozycję oraz wykonuje obserwacje (skan) szczegółów terenowych.

2. Urządzenie przemieszcza się. Przebyta droga rejestrowana jest za pomocą wbudowanych czujników (m.in. odometrów).

3. Na podstawie uzyskanych z czujników danych (odometrii, czyli trasy ruchu urządzenia) zostaje wyznaczona nowa, zgrubna pozycja robota.

4. Robot wykonuje obserwacje (skan) na kolejnym stanowisku.

5. Na podstawie zgrubnej pozycji robota do modelu otoczenia dołożona zostaje zarejestrowana chmura punktów; model zostaje rozbudowany.

6. Z powodu niskiej jakości danych z czujników robotycznych tożsame szczegóły pomierzone z różnych stanowisk nie pokrywają się. Wyznacza się wzajemne relacje pomiędzy nimi i na tej podstawie przelicza się i poprawia informację o położeniu jednostki mobilnej. Korekta jakości położenia skutkuje ponownym przeliczeniem modelu i poprawą jego dokładności (spójności wewnętrznej).

Tym sposobem iteracyjnie zostaje zarówno wyznaczona pozycja robota, jak i zbudowany spójny model otoczenia. Ze względu na złożoność zagadnienia nad jego rozwiązaniem pracowało wiele zespołów badawczych – algorytm 6D SLAM jest jednym z takich rozwiązań. Tę praktyczną realizację założeń SLAM opracowała grupa niemieckich uczonych i zaprezentowała po raz pierwszy w artykule z 2004 roku (Nüchter A. i in.). W ramach badania dokładności algorytmu zdecydowali się porównać modele obiektu (otoczenia) stworzone z jego wykorzystaniem z modelem referencyjnym opracowanym

poprzez ręczną orientację chmur punktów.

• Dlaczego to miejsce i ten budynek?

Na pomiar, który miał nam dostarczyć danych niezbędnych do przeprowadzenia badań, udaliśmy się aż do Kłomina oddalonego o 330 kilometrów od Warszawy. W tej niewielkiej osadzie położonej wśród lasów Pojezierza Pomorskiego (i w Bornem Suliniowie) przez kilkadziesiąt lat stacjonowały oddziały radzieckie. Miasteczko opuszczone w 1992 roku przez wojskowych i ich rodziny pozostaje niemal niezamieszkane. Po czerwonoarmistach pozostały niszczące i stopniowo rozbierane budynki. Obecnie Kłomino bywa nazywane miastem widmem.

Spośród kilku ocalałych budynków do pomiaru wybraliśmy pięciokondygnacyjny blok mieszkalny. Na pewno przemawiał za tym fakt, iż znajdował się on na terenie otwartym, nie było więc konieczności uzyskania jakichkolwiek pozwoleń. Również wejście do samego budynku okazało się możliwe, dzięki czemu tarcze pomiarowe mogliśmy rozmieścić na dowolnych kondygnacjach. Ponieważ niemal całe Kłomino pozostaje opuszczone, nie ma w nim przechodniów, którzy, mijając robota, mogliby zostać uwiecznieni na wyko-

nywanych chmurach punktów lub przeszkodzić w skanowaniu w jakiś inny sposób.

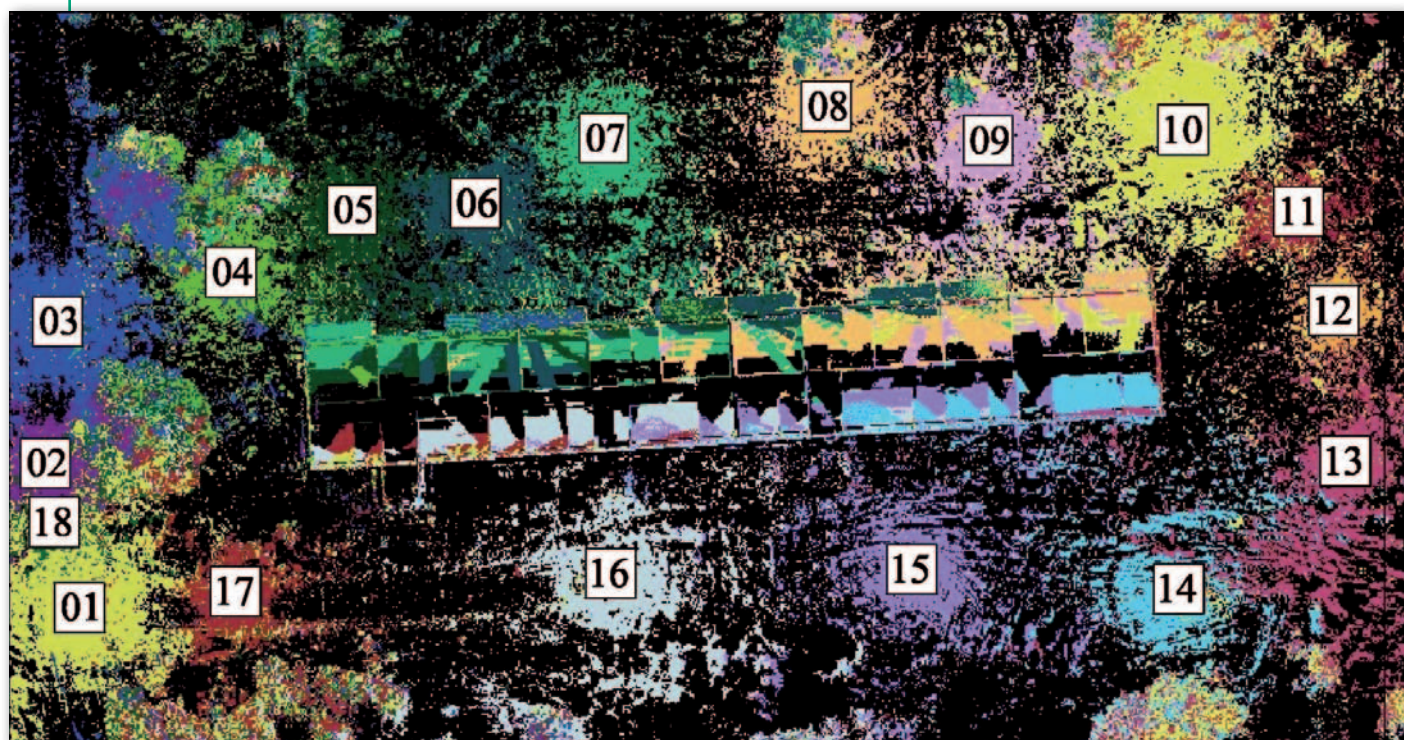
• Co stanowiło obiekt pomiaru?

Prace pomiarowe w Kłominie trwały dwa dni i zaczęły się od stabilizacji tarcz pomiarowych na ścianach bloku i utrwalenia w terenie osnowy. Wybrany budynek nie wyróżniał się skomplikowaną bryłą, więc uznaliśmy, że prosta, czteropunktowa osnowa o kształcie zbliżonym do prostokąta będzie odpowiednia. Pomiar wykonaliśmy wydziałowym tachimetrem Leica TCRP 1201+. Po pomiarze statywy z tarczami pozostały na punktach osnowy, tak aby mogły być zarejestrowane w trakcie skaningu.

Najważniejszym etapem pracy był przejazd pomiarowy robota mobilnego wraz z rejestracją chmur punktów za pomocą zintegrowanego z nim skanera. Trasa przejazdu i miejsca wykonywania skanów były w dużej mierze uzależnione od ukształtowania i pokrycia terenu wokół bloku. Pomiar trwał niecałe 4 godziny. W tym czasie robot przejechał około 300 metrów i zarejestrował 18 chmur punktów (wykorzystanych zarówno do budowy modelu referencyjnego, jak i modeli algorytmicznych). W trakcie przejazdu podzespoły platformy mobilnej rejestrowały również niskodokładne wartości parametrów orientacji (liniowych i kątowych) kolejnych jego stanowisk.

• Jak wyglądał proces badania algorytmu?

Opracowanie rozpoczęliśmy od wyrównania osnowy metodą najmniejszych kwadratów. Nie została ona nawiązana do żadnego zewnętrznego układu, dlatego sami zdefiniowaliśmy lokalny układ odniesienia. Wyliczyliśmy współrzędne punktów (X, Y i Z) oraz ich błędy średnie (RMS), których wartości nie przekroczyły 0,5 mm.



Rozmieszczenie skanów w modelu

Następnie przystąpiliśmy do budowy modelu referencyjnego: ręcznej orientacji chmur punktów. Zarejestrowane punkty osnowy pozwoliły na przeprowadzenie georeferencji skanów do lokalnego układu. Wzajemną orientację zrealizowaliśmy na podstawie punktów łącznych. Były nimi rozmieszczone na ścianach papierowe tarcze oraz łatwo identyfikowalne punkty charakterystyczne budynku. Precyzyjnie przeprowadzony proces orientacji oraz wykorzystanie dokładnej osnowy dały w wyniku model referencyjny charakteryzujący się błędem średnim (RMS) na poziomie 2,9 mm.

Modele bloku mieszkalnego, których dokładność badaliśmy względem modelu referencyjnego, powstały przy wykorzystaniu dwóch wersji algorytmu 6D SLAM: pierwotnego (model 1), stworzonego przez niemieckich naukowców, oraz poprawionego i w dalszym ciągu optymalizowanego przez zespół z Instytutu Automatyki i Robotyki PW. W przypadku zmodyfikowanego algorytmu stworzone zostały cztery modele (2, 3, 4, 5). Aby wyjaś-

nić, na czym polegały różnice w ich generowaniu, musimy przybliżyć zasadę działania jednego z elementów algorytmu 6D SLAM – wzajemnego dopasowania sąsiednich chmur punktów. Proces ten realizowany jest poprzez poszukiwanie odpowiadających sobie punktów na skanach za pomocą kryterium najbliższego sąsiedztwa. W algorytmie poprawionym zarejestrowana chmura punktów została dodatkowo pogrupowana w regularne zbiory (tzw. koszyki) i to między nimi wykonywane są obliczenia. Poszczególne modele różnią się od siebie liczbą punktów branych pod uwagę w koszyku podczas wyszukiwania najbliższych sąsiadów. Wraz ze zwiększeniem ich liczby następuje wydłużenie się czasu wzajemnego dopasowania kolejnych chmur punktów, a co za tym

idzie – pracy całego algorytmu.

W trakcie przeprowadzania badań okazało się, że uzyskanie wyników (w postaci kompletnego modelu) nie jest możliwe przy wykorzystaniu „surowych” danych pomiarowych. Konieczna okazała się filtracja i przepróbkowanie chmur punktów – we wszystkich modelach (oprócz 5) wykorzystano skany z uprzednio usuniętymi zbędnymi elementami (np. drzewami).

Sposób generowania kolejnych modeli:

- model 1 – uzyskany z niezmodyfikowanej wersji algorytmu,

- model 2 – uzyskany za pomocą poprawionego algorytmu, przepróbkowany, z odfiltrowanymi drzewami; liczba punktów branych pod uwagę w koszyku – 50, czas pracy algorytmu 415 s,

- model 3 – uzyskany za pomocą poprawionego algorytmu, przepróbkowany, z odfiltrowanymi drzewami; liczba punktów branych pod uwagę w koszyku – 300, czas pracy algorytmu 1754 s,

- model 4 – uzyskany za pomocą poprawionego algorytmu, przepróbkowany, z odfiltrowanymi drzewami; liczba punktów branych pod uwagę w koszyku – 1000, czas pracy algorytmu 4770 s,

- model 5 – uzyskany za pomocą poprawionego algorytmu, przepróbkowany, bez filtracji, z pozostawionymi drzewami; liczba punktów branych pod uwagę w koszyku – 300, czas pracy algorytmu 3527 s.

W przypadku modelu 1 czas dopasowania nie jest istotny. Z racji wykorzystania innej wersji algorytmu nie sposób go odnieść do

Dokładność wyznaczenia elementów orientacji modelu

Ozn. modelu	σ_x [m]	σ_y [m]	σ_z [m]	σ_ω [g]	σ_ϕ [g]	σ_κ [g]
model 1	0,247	0,119	0,203	0,3484	0,5883	0,2928
model 2	0,039	0,034	0,194	0,5381	0,8654	0,1208
model 3	0,035	0,034	0,036	0,1495	0,2258	0,1051
model 4	0,038	0,042	0,034	0,138	0,1732	0,0906
model 5	0,017	0,034	0,018	0,0849	0,1113	0,0745

czasów generowania pozostałych modeli.

● Jakie rezultaty uzyskaliśmy?

W wyniku działania algorytmu uzyskaliśmy dla każdego z modeli parametry orientacji tworzących go skanów zdefiniowane w różnych wewnętrznych układach. Aby przeprowadzić badanie, musieliśmy przetransformować modele algorytmiczne do układu osnowy. Wykonaliśmy sześcioparametrową transformację bez zmiany skali.

Wszystkie modele zostały zbudowane z tych samych chmur punktów, dlatego mogliśmy porównać przetransformowane liniowe i kątowe elementy orientacji kolejnych skanów. Wyznaczyliśmy odchyłki od modelu referencyjnego i na ich podstawie obliczyliśmy błędy średnie parametrów orientacji.

Zmiany wprowadzone do algorytmu przez pracowników IAIr PW w znaczący sposób przyczyniły się do wzrostu dokładności modeli stworzonych za jego pomocą (tabela na s. obok). Jedynie model 2 o najkrótszym czasie generowania cechujący dokładności parametrów kątowych niższe niż w modelu 1. Widoczne jest również zmniejszanie się błędów średnich wraz ze zwiększeniem liczby punktów biorących udział w dopasowaniu, a co za tym idzie – wraz z wydłużaniem się czasu pracy algorytmu.

Wyjątek stanowi model 5, którego czas generowania nie jest najdłuższy, a mimo to jest on najdokładniejszy. Pozostawienie na skanach drzew (dodatkowych danych) wydaje się nie tylko nie pogarszać jakości stworzonego modelu, ale wręcz przyczyniło się do wzrostu jego dokładności. Przypadek modelu 5 dowodzi, że na globalną dokładność wpływa wiele czynników i nie jest to tylko liczba punktów w koszyku.

W wyniku przeprowadzonego badania możemy stwierdzić, że wprowadzone do al-



Wizualizacja modelu referencyjnego

gorytmu 6D SLAM poprawki spowodowały wzrost dokładności uzyskanych modeli. Ale nawet najlepsze modele są zbyt mało dokładne, aby wykorzystać je w precyzyjnych geodezyjnych zadaniach inżynierskich, takich jak badanie przemieszczeń czy odkształceń obiektów. Jednak wszędzie tam, gdzie oczekuje się dokładności rzędu kilku lub kilkunastu centymetrów, mogłyby znaleźć zastosowanie. W automatyce i robotyce, w której modele SLAM wykorzystywane są do nawigacji przestrzennej robotów, uzyskane przez nas dokładności można uznać za sukces.

● Czy robot mobilny będzie w stanie zastąpić geodetę?

Osobnym zagadnieniem pozostaje ekonomiczna i czyisto praktyczna zasadność wykorzystania w geodezji opisanej przez nas technologii w jej obecnej formie. Aktualny poziom rozwoju robotyki w połączeniu z niemałym wydatkiem na zakup platformy powodują, że robot mobilny pozostanie ciekawostką bez perspektywy szerszego zastosowania w ciągu najbliższych kilku lat. Jednak dalsza optymalizacja sprzętu i oprogramowania czy ewentualna adaptacja innych metod pomiarowych skutkująca uzyskaniem lepszych wyników pozwalają snuć przypuszczenia, że algorytm 6D SLAM i robotyka zagoszczą w końcu

w praktyce geodezyjnej. Pytanie tylko, kiedy to nastąpi.

Jak już wspomnieliśmy, przeszkodą na drodze do robotyzacji geodezji jest w dalszym ciągu rozwijana, a więc jeszcze niedoskonała technologia. Opisany przez nas eksperyment pokazuje dobitnie, że praktyczna realizacja zagadnienia SLAM jest w powijakach, a pełna autonomia, niezależna od jakiegokolwiek zewnętrznego systemu lokalizacyjnego, pozostaje odległą pieśnią przyszłości. Badania nie zostają jednak zawieszone i można domniemywać, że jednostki mobilne w końcu uzyskają niezależność od ludzkiego operatora. Trudno obecnie wyobrazić sobie robota ze skanerem, taśmą oraz urządzeniem do wbijania kołków inwentaryzującego przyłącze czy tył budynek. W bliższej przyszłości autonomiczne jednostki mobilne mają szansę znalezienia zastosowania, ale w bardziej specjalistycznych pracach.

Cieszący się rosnącą popularnością wśród geodetów skanowanie laserowe wydaje się idealnym kandydatem do mariażu z robotyką mobilną, co po części udowodnił nasz eksperyment. Skaner dostarcza robotowi mobilnemu danych do wygenerowania modelu otoczenia i wyznaczenia własnej pozycji, które umożliwiają jednostce nawigację. Model otoczenia dla platformy mobilnej nie jest ce-

lem samym w sobie, ale dla geodetów może stanowić finalny produkt. Generowany w czasie rzeczywistym, gotowy z chwilą zakończenia pomiaru trójwymiarowy model jest nie lada atutem przemawiającym za wykorzystaniem robotyki mobilnej. Zamiast żmudnych pomiarów, ciągłych zmian stanowiska – jeden przejazd robota. To właśnie ten sposób wykorzystania autonomicznego robota mobilnego jest najbliższy urzeczywistnieniu. Aby jednak ten scenariusz mógł się ziścić, potrzebne są lata dalszych badań. A co potem, za kilka dekad? Same roboty pomiarowe i żądnych geodetów? Tak daleko w przyszłość lepiej nie wybiegać, bo podobnym rozważaniom bliżej do fantastyki niż rzetelnych prognoz.

Dariusz Andrzejewski,
Damian Czekaj

Literatura

Nüchter A., Surmann H., Lingemann K., Hertzberg J., Thrun S., 2004: 6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping. 2004 IEEE Int. Conference on Robotics & Automation, New Orleans, Los Angeles, s. 1998-2003;

Na podstawie pracy magisterskiej „Badanie dokładności algorytmu 6D SLAM stosowanego w nawigacji przestrzennej robotów mobilnych” napisanej przez autorów artykułu w Zakładzie Geodezji Inżynierskiej i Pomiarów Szczegółowych WGiK PW pod kierunkiem prof. Edwarda Nowaka