

Tabla de Contenido

| | |
|--|----------|
| Índice de Tablas | vii |
| Índice de Ilustraciones | viii |
| Acrónimos | xii |
| Notación | xiv |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Hipótesis | 4 |
| 1.2. Objetivos generales | 4 |
| 1.3. Objetivos específicos | 4 |
| 1.4. Contribuciones del trabajo | 4 |
| 1.5. Estructura de la tesis | 5 |
| 2. Marco Teórico | 6 |
| 2.1. Preliminares | 6 |
| 2.1.1. Uso del lenguaje y tipografías | 6 |
| 2.1.2. Definiciones matemáticas | 6 |
| 2.1.3. Geometría de cámaras | 9 |
| 2.1.4. Geometría de una cámara <i>pinhole</i> | 9 |
| 2.1.5. Geometría de dos vistas o <i>epipolar</i> | 11 |
| 2.2. ¿Qué es SLAM? | 13 |
| 2.2.1. L: El problema de localización | 13 |
| 2.2.2. M: El problema de mapeo | 14 |
| 2.2.3. S: El problema de simultaneidad | 14 |
| 2.2.4. El problema de cerrado de <i>loops</i> | 14 |
| 2.2.5. Formalización actual de SLAM | 14 |
| 2.3. SLAM Visual | 19 |
| 2.3.1. Taxonomía de un sistema de SLAM Visual | 19 |
| 2.3.2. Sensores visuales | 19 |
| 2.3.3. Tracking | 20 |
| 2.3.4. Mapeo | 23 |
| 2.3.5. Estimación | 25 |
| 2.3.6. Discusión | 26 |
| 2.4. ORB-SLAM | 28 |
| 2.4.1. <i>Tracking</i> | 28 |
| 2.4.2. <i>Local Mapping</i> | 30 |
| 2.4.3. <i>Loop Closing</i> | 30 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.5. | Robots Humanoides | 31 |
| 2.5.1. | ¿Qué hace especial a un robot humanoide? | 31 |
| 2.5.2. | Estimación de estados y localización en robots humanoides | 32 |
| 3. | Extendiendo las capacidades del NAO con la NAO Backpack | 35 |
| 3.1. | Robot NAO | 35 |
| 3.1.1. | Software | 36 |
| 3.1.2. | Framework B-Human | 37 |
| 3.1.3. | Limitaciones: una opinión personal | 37 |
| 3.2. | NAO Backpack | 38 |
| 3.2.1. | Diseño general | 38 |
| 3.2.2. | Estructura física | 39 |
| 3.2.3. | Electrónica | 40 |
| 3.2.4. | Software | 42 |
| 3.3. | Resultados | 45 |
| 3.4. | Discusión | 45 |
| 4. | ORB-SLAM para humanoides con fusión de información propioceptiva | 46 |
| 4.1. | Sistema propuesto | 46 |
| 4.2. | Sistema de coordenadas | 48 |
| 4.3. | Nuevo <i>thread</i> : Robot Estimator | 49 |
| 4.4. | Modificaciones en <i>Tracking</i> | 49 |
| 4.4.1. | Predicción cinemática | 49 |
| 4.4.2. | Pose Optimization | 49 |
| 4.4.3. | Pérdida del tracking | 52 |
| 4.5. | Modificaciones en <i>Local Mapping</i> | 52 |
| 4.5.1. | Inicialización de escala | 52 |
| 4.5.2. | Local Bundle Adjustment | 54 |
| 4.5.3. | Eliminación de keyframes | 56 |
| 4.6. | Modificaciones en <i>Loop Closing</i> | 56 |
| 4.7. | Consideraciones técnicas adicionales | 56 |
| 4.7.1. | La estructura de datos <code>RobotState</code> | 56 |
| 4.7.2. | Desplazamientos relativos y propagación de covarianza | 56 |
| 4.7.3. | Simulación de odometría | 57 |
| 4.8. | Discusión | 57 |
| 5. | Calculando la Odometría en un Robot Humanoide | 59 |
| 5.1. | Algoritmos de odometría de robots humanoides | 59 |
| 5.2. | Propuestas investigadas | 60 |
| 5.2.1. | Idea inicial: Estimador basado en ventana deslizante | 60 |
| 5.2.2. | Idea final: El reciente Two-State Implicit Filter (TSIF) | 61 |
| 5.3. | Estimación de odometría con el TSIF | 64 |
| 5.3.1. | Estado | 64 |
| 5.3.2. | Residuos | 65 |
| 5.3.3. | Otras consideraciones | 70 |
| 5.4. | Discusión | 72 |
| 6. | Resultados | 73 |
| 6.1. | Métricas de evaluación | 73 |
| 6.1.1. | <i>Absolute Pose Error (APE)</i> | 73 |
| 6.1.2. | <i>Relative Pose Error (RPE)</i> | 74 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.1.3. | Sobre los estadísticos | 74 |
| 6.2. | Experimentos | 74 |
| 6.2.1. | Experimento 1: Evaluación de mejoras propuestas con odometría simulada libre de ruido | 74 |
| 6.2.2. | Experimento 2: Análisis de sensibilidad de la odometría con ruido artificial . . | 81 |
| 6.2.3. | Experimento 3: Evaluación del estimador de odometría propuesto | 84 |
| 6.2.4. | Experimento 4: Evaluación de integración (bases de datos) | 89 |
| 6.2.5. | Experimento 5: Evaluación de integración (robot real) | 93 |
| 7. | Conclusiones | 97 |
| 7.1. | Sobre este trabajo | 97 |
| 7.1.1. | NAO Backpack | 97 |
| 7.1.2. | SLAM Visual | 97 |
| 7.1.3. | Estimador de odometría | 98 |
| 7.1.4. | Integración | 98 |
| 7.2. | Desafíos futuros | 98 |
| | Bibliografía | 100 |
| | Apéndices | 113 |
| A. | Especificaciones del robot NAO | 113 |
| B. | Preparación de los experimentos | 114 |
| B.1. | Instrumentos y configuración | 114 |
| B.1.1. | Laboratorio de Rehabilitación UNAB | 114 |
| B.1.2. | Usando el Optitrack como <i>ground truth</i> | 114 |
| B.2. | Bases de datos | 117 |
| C. | Grupos de Lie | 119 |
| C.1. | Conceptos básicos | 119 |
| C.1.1. | Variedades | 119 |
| C.1.2. | Variedades suaves | 120 |
| C.1.3. | Grupos de Lie | 120 |
| C.1.4. | Álgebra de Lie | 120 |
| C.2. | Grupos de Lie importantes para este trabajo | 123 |
| C.2.1. | El grupo de rotaciones $SO(3)$ | 123 |
| C.2.2. | El grupo de transformaciones de cuerpo rígido $SE(3)$ | 123 |
| C.3. | Distribuciones de probabilidad en $SE(3)$ | 124 |
| D. | Lo que se intentó y no funcionó, además de otros aprendizajes | 128 |
| D.1. | Validación del sistema usando Webots | 128 |
| D.2. | Problemas con el estimador de odometría basado en g2o | 129 |
| E. | Derivación del modelo cinemático de la IMU | 131 |
| E.1. | Modelo cinemático | 132 |
| E.2. | Mediciones y ruido de las mediciones | 132 |
| F. | Agradecimientos | 136 |